R. Lauenstein,

Die Mechanik.



5-1. Mechanics — Textbooks, 1907

8 n D

Die Mechanik.

Elementares Lehrbuch

für den Schul- und Selbstunterricht sowie zum Gebrauch in der Praxis

von

R. Lauenstein,
weiland Baurat und Professor an der Baugewerkeschule in Karlsruhe.

Siebente Auflage.

Bearbeitet von **C. Ahrens,**
Professor an der Baugewerkeschule in Karlsruhe.

Mit 218 Abbildungen.



Stuttgart 1907.
Alfred Kröner Verlag.

Druck von Carl Grüninger, K. Hofbuchdruckerei Zu Gutenberg (Klett & Hartmann), Stuttgart.

Vorwort.

Das vorliegende Lehrbuch der Mechanik schließt sich den in demselben Verlage erschienenen Arbeiten des Verfassers: „Festigkeitslehre“ und „Graphische Statik“ an und bildet mit ihnen zusammen ein Ganzes. Es brauchte deshalb bei der Bearbeitung der „Mechanik“ auf die Elastizität der festen Körper keine Rücksicht genommen zu werden und kann in bezug auf diese auf des Verfassers „Festigkeitslehre“ verwiesen werden.

Die Einteilung des Stoffes ist die allgemein übliche; Umfang und Auswahl desselben ist den Bedürfnissen des Unterrichts an technischen Mittelschulen möglichst angepaßt; dabei mehr Gewicht gelegt auf praktische Anwendungen als auf rein theoretische Untersuchungen, mit denen erfahrungsgemäß denjenigen Technikern, welche ihre Ausbildung auf einer Baugewerkeschule oder einer ähnlichen Anstalt erhalten haben, im allgemeinen wenig gedient ist.

Jedem einzelnen Abschnitte ist eine Reihe von einfachen praktischen Aufgaben nebst ihren Lösungen beigefügt, um die Anwendung der entwickelten Formeln zu erläutern und die zum selbständigen Gebrauch derselben erforderliche Übung und Sicherheit zu erlangen.

Die technischen Mittelschulen müssen bekanntlich wegen der Kürze der Studienzeit an den Fleiß der Schüler außerordentlich hohe Anforderungen stellen, und es sind daher passende Lehrbücher schon aus dem Grunde erwünscht, weil sie das sonst übliche, viel Zeit in Anspruch nehmende Diktieren

bezw. die Ausarbeitung der Vorträge überflüssig machen und mehr freie Zeit zur Einübung des Lehrstoffes gewähren.

So möge denn das vorliegende Lehrbuch zur Erleichterung des Unterrichts in der Mechanik für den Lehrer sowohl wie für die Schüler beitragen.

Karlsruhe, Januar 1904.

R. Lauenstein.

Vorwort zur siebenten Auflage.

Der Aufforderung, auch die Weiterbearbeitung der „Mechanik“ zu übernehmen, habe ich gern entsprochen. Es soll meine Aufgabe sein, diese Bearbeitung im Sinne meines leider zu früh verstorbenen Freundes und Kollegen Rudolf Lauenstein durchzuführen.

Vorschläge zur Verbesserung und Ergänzung des Buches werde ich immer mit Dank entgegennehmen.

Ich hoffe, daß die „Mechanik“ auch fernerhin eine freundliche Aufnahme finden werde.

Karlsruhe, Oktober 1906.

E. Ahrens.

Inhalt.

Anhang.



Abschnitt I.

Grundbegriffe der Mechanik.

§ 1.

Einleitung.

Die Mechanik handelt von den Kräften und den Bewegungen (oder Bewegungsänderungen), welche durch dieselben bewirkt werden.

Die Kräfte selbst sind uns unbekannt; wir können nur deren Wirkungen auf die Körper wahrnehmen. Kraft läßt sich zwar erklären als Ursache der Bewegung (oder Bewegungsänderung); damit ist aber das eigentliche Wesen der Kraft noch nicht festgestellt. Den Ursprung jeder Kraft bildet ein Körper; die Wirkung der Kraft sehen wir an einem anderen Körper, welcher durch dieselbe bewegt oder in seiner Bewegung geändert wird. In bezug auf den ersten Körper ist daher die Kraft als Wirkung, in bezug auf den zweiten als Ursache der Bewegung aufzufassen. Man versteht also unter „Kraft" die Wirkung eines Körpers auf die Bewegung eines anderen.

Gerät ein ruhender Körper unter Einwirkung einer Kraft nicht in Bewegung, so läßt sich dieses dadurch erklären, daß Gegenkräfte vorhanden sind, oder daß die Kraft nicht groß genug ist, die Widerstände, welche sich der Bewegung des Körpers entgegensetzen, zu überwinden.

Die zu betrachtenden Körper können sich daher im Zustande der Ruhe (im Gleichgewichte) oder der Bewegung befinden. Die Körper selbst können ferner fest, tropfbar flüssig oder gasförmig sein, wonach sich für die gesamte Mechanik folgende Einteilung ergibt:

1. Die Lehre vom Gleichgewicht und von der Bewegung fester Körper.
2. „ „ „ „ „ „ „ „ flüssiger „
3. „ „ „ „ „ „ „ „ gasförmiger „

Allgemein wird die Lehre vom Gleichgewicht mit Statik, die Lehre von der Bewegung mit Dynamik bezeichnet.

§ 2.

Allgemeine Eigenschaften der Körper.

Wir nehmen mit unseren Sinnen Materie oder Stoff wahr. Die Menge der im Weltenraume vorhandenen Materie ist unveränderlich.

Begrenzte Materie nennen wir einen Körper; den Raum, den derselbe einnimmt, sein Volumen; die Menge der in ihm enthaltenen Materie seine Masse.

Die Körper besitzen folgende allgemeine Eigenschaften:

1. Räumliche Ausdehnung nach Länge, Breite und Höhe.
   Als Längenmaß dient das Meter (der zehnmillionste Teil eines Erdquadranten) oder dessen Unterabteilungen (Zentimeter, Millimeter).
2. Undurchdringlichkeit oder das Behaupten des eigenen Raumes; d. h. der von einem Körper erfüllte Raum kann nicht gleichzeitig von einem anderen Körper eingenommen werden.
3. Schwere. Die Körper haben vermöge der Anziehungskraft der Erde (der Schwerkraft) das Bestreben, sich deren Mittelpunkt zu nähern; sie üben infolgedessen auf eine Unterlage einen Druck aus, welcher das Gewicht des Körpers genannt wird.
   Als Gewichtseinheit dient das Kilogramm, d. i. das Gewicht eines Kubikdezimeters reinen destillierten Wassers von 4^0 C.
   Die Richtung, in welcher sich ein frei fallender Körper bewegt, heißt lotrecht oder senkrecht (vertikal), eine darauf winkelrechte Linie oder Ebene wagerecht (horizontal).
4. Teilbarkeit. Jeder Körper ist teilbar. Die mechanisch kleinsten Teilchen, aus denen ein Körper besteht, heißen Moleküle (Massenteilchen); diese können chemisch aber noch aus mehreren Atomen zusammengesetzt sein.
5. Porosität. Das Volumen eines Körpers wird von dem Materiale nicht stetig erfüllt; es sind stets Zwischenräume oder Poren vorhanden, die bei einigen Körpern (z. B. beim Schwamm) schon mit bloßem Auge, bei anderen dagegen nur mit Hilfe des Mikroskopes wahrnehmbar sind.
   Eine unmittelbare Folge der Porosität ist die Zusammendrückbarkeit und Ausdehnbarkeit der Körper. Diese Eigenschaften zeigen sich am deutlichsten bei den Gasen, am unvollkommensten bei den tropfbar-flüssigen Körpern.
6. Kohäsion nennt man die gegenseitige Anziehung der sich berührenden einzelnen Teilchen eines und desselben Körpers. Die Kohäsion äußert sich bei den festen Körpern in dem Widerstande, welchen diese der Trennung oder Verschiebung ihrer Teile entgegensetzen (Festigkeit); bei den flüssigen Körpern in dem Bestreben, Kugelgestalt anzunehmen (z. B. beim Regentropfen).
7. Adhäsion ist die gegenseitige Anziehung der sich berührenden einzelnen Teilchen zweier verschiedener Körper. Die Adhäsion läßt sich

z. B. beobachten, wenn man zwei sorgfältig abgeschliffene Metallplatten aneinander drückt und sie darauf zu trennen sucht oder wenn man eine ins Wasser getauchte ebene Platte lotrecht abhebt.

Auf der Adhäsion beruhen die Erscheinungen der Kapillarität oder Haarröhrchenanziehung. Es ist dieses die Eigentümlichkeit enger Röhren und Kanäle, in eine Flüssigkeit eingetaucht, diese an ihren Wänden emporzuziehen und sie bis über den Spiegel der äußeren Flüssigkeit aufsteigen zu lassen.

Diese Erscheinung zeigt sich aber nur bei solchen Flüssigkeiten, bei denen die Kohäsion der einzelnen Teilchen geringer ist als die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem eingetauchten Röhrchen (benetzende Flüssigkeiten im Gegensatz zu nicht benetzenden Flüssigkeiten); z. B. steht Wasser in einem Glasröhrchen über, Quecksilber dagegen unter dem äußeren Flüssigkeitsspiegel.

8. Elastizität nennt man die Fähigkeit eines Körpers, seine ursprüngliche, aber durch äußere Kräfte veränderte Form nach Aufhören der Kraftwirkung wieder anzunehmen.

Bis zu einem gewissen Grade sind alle Körper elastisch; einen vollkommen elastischen Körper gibt es jedoch nicht, ebensowenig aber auch einen vollkommen unelastischen Körper.

§ 3.

Die geometrischen Bewegungen der Körper.

Bei der Bewegung der Körper finden Ortsänderungen und zugleich Zeitänderungen statt; es sind daher die Beziehungen, welche zwischen den zurückgelegten Wegen und den dabei verflossenen Zeiten bestehen, zu entwickeln. Dabei sollen zunächst die Ursachen der Bewegung, also die Kräfte, unberücksichtigt bleiben.

Die Bewegung eines Körpers bestimmt sich aus der im allgemeinen verschiedenen Bewegung seiner einzelnen Punkte. Da es bei fortschreitenden Bewegungen in vielen Fällen aber nur auf die Bewegung des Körpers im großen und ganzen ankommt, so kann der Einfachheit wegen in allen solchen Fällen der sich bewegende Körper als Massenpunkt (materieller Punkt) behandelt werden, d. h. als geometrischer Punkt, in welchem die Masse des Körpers vereinigt gedacht wird.

1. Einfache Bewegungen.

Man unterscheidet geradlinige und krummlinige, ferner gleichförmige und ungleichförmige Bewegungen.

Eine gleichförmige Bewegung (sie möge geradlinig oder krummlinig sein) ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden, so daß sich die zurückgelegten Wege zueinander verhalten, wie die dabei

verflossenen Zeiten. Der in der Zeiteinheit (1 sec.) zurückgelegte Weg heißt die **Geschwindigkeit**.

Bezeichnet man die Geschwindigkeit mit c, die Zeit, in welcher der Weg s zurückgelegt wird, mit t, so ist:

der Weg, welcher in 1 sec. zurückgelegt wird = c
" " " " 2 " " " = 2c
. . . .
allgemein " " " " t " " " = tc

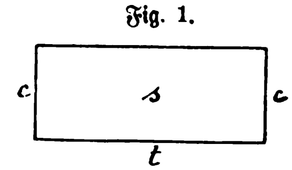
also:

$$s = ct \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

oder in Worten:

Weg = Geschwindigkeit × Zeit.

Fig. 1.

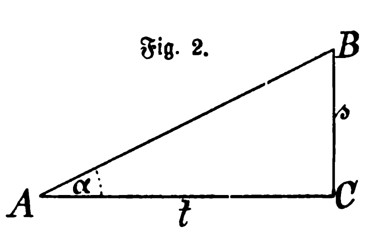


Da der Weg s hier als Produkt zweier Faktoren c und t erscheint, so kann derselbe graphisch dargestellt werden als Rechteck, dessen Grundlinie = t und dessen Höhe = c ist (Fig. 1).

Die Gl. 1) läßt sich auch schreiben:

$$c = \frac{s}{t} \quad \ldots \quad 2)$$

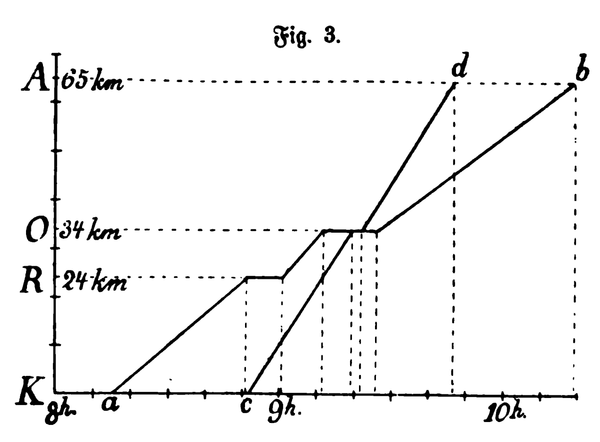
Fig. 2.



Danach erscheint, wenn man in einer anderen graphischen Darstellung (Fig. 2) die Zeiten als wagerechte, die Wege als lotrechte Strecken aufträgt, die Geschwindigkeit c als Tangente des Winkels α, den die Gerade A B mit der Zeitlinie A C einschließt.

Aus dem größeren oder kleineren Neigungswinkel der Geraden A B erkennt man die größere oder geringere Geschwindigkeit der Bewegung. Eine stark ansteigende Linie A B bezeichnet eine schnellere, eine flach geneigte Linie A B eine langsamere Bewegung. Eine abwärts statt aufwärts geneigte Gerade würde eine Bewegung mit negativer Geschwindigkeit, also eine rückläufige Bewegung darstellen.

Fig. 3.



Eine Gerade, welche der Zeitlinie parallel läuft (α = Null), bezeichnet den Ruhezustand.

In dieser Weise sind z. B. die graphischen Fahrpläne der Eisenbahnen angefertigt. Der in Fig. 3 durch die gebrochene Linie a b dargestellte Personenzug fährt 8^{15} von Karlsruhe (K) ab, kommt 8^{51} nach Rastatt (R), hat dort Aufenthalt bis 9^{01}, er-

reicht Oos (O) um 9^{12}, verweilt dort 14 Minuten und fährt um 9^{26} weiter nach Appenweier (A), wo er 10^{19} eintrifft.

Der von Karlsruhe um 8^{52} abgehende Schnellzug c d, dessen größere Geschwindigkeit aus dem größeren Neigungswinkel hervorgeht, fährt in Rastatt ohne Aufenthalt durch, erreicht Oos um 9^{19}, überholt dort den Personenzug, indem er schon 9^{22} weiterfährt und um 9^{47} in Appenweier ankommt.

Führt der Körper eine geradlinig fortschreitende Bewegung aus, so sind die Bewegungen seiner sämtlichen Punkte ebenfalls geradlinig fortschreitend. Dreht sich aber der Körper um eine feste Achse, mit welcher er unveränderlich verbunden ist, so beschreibt jeder außerhalb dieser Achse liegende Punkt des Körpers einen Kreis, dessen Mittelpunkt die Achse bildet und dessen Ebene auf dieser winkelrecht steht. Ist die Drehung des Körpers und folglich jedes Punktes desselben in seinem Kreise gleichförmig, und wird die Anzahl der Umdrehungen in der min. mit n bezeichnet, so ist nach Gl. 2) die Geschwindigkeit eines in der Entfernung r von der Drehachse befindlichen Punktes:

$$c = \frac{s}{t} = \frac{2 r \pi n}{60} \qquad \text{3)}$$

Bei der veränderlichen Bewegung werden in gleichen Zeiten ungleiche Wege zurückgelegt; die Geschwindigkeit ändert sich daher in jedem Augenblick. Trotzdem kann auch bei einer solchen Bewegung von der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitpunkte die Rede sein. Man versteht darunter den Weg, welchen der sich bewegende Körper in der nächstfolgenden Sekunde zurücklegen würde, wenn er sich von diesem Zeitpunkte an gleichmäßig fortbewegte.

Die Geschwindigkeitsänderung kann bei der veränderlichen Bewegung wieder gleichförmig oder ungleichförmig sein, wonach man gleichförmig veränderte und ungleichförmig veränderte Bewegungen unterscheidet. Auf die letzteren gehen wir hier nicht näher ein.*)

Eine gleichförmig veränderte Bewegung ist eine solche, bei welcher sich die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten um gleiche Größen ändert. Die in der Zeiteinheit (1 sec.) erfolgende

Geschwindigkeitszunahme heißt Beschleunigung,
" -abnahme " Verzögerung.

Die Verzögerung kann als negative Beschleunigung angesehen werden.

Bezeichnet man die Beschleunigung mit p, die Anfangsgeschwindigkeit mit c, die nach t Sekunden erlangte Endgeschwindigkeit mit v, so ist:

die Geschwindigkeit nach 1 sec. $= c + p$
" " " 2 " $= c + 2p$
. . . .
allgemein " " " t " $= c + pt$

also:

$$v = c + pt$$

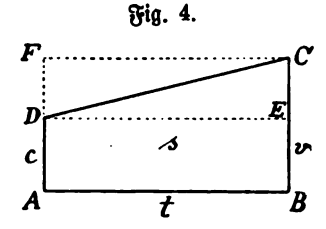
*) Eine ungleichförmig veränderte Bewegung ist z. B. die Bewegung des Kolbens bezw. Kreuzkopfes beim Kurbeltrieb (vergl. Fig. 16).

woraus sich für die Beschleunigung p ergibt:

$$p = \frac{v - c}{t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Die gleichförmig beschleunigte Bewegung läßt sich in ähnlicher Weise wie in Fig. 1 graphisch darstellen durch Fig. 4, in welcher $AB = t$, $AD = c$, $BC = v$ ist.

Fig. 4.



Der während der Zeit t zurückgelegte Weg s ist gleich dem Inhalt des Trapezes ABCD; folglich:

$$s = \left(\frac{v + c}{2}\right) t \quad \ldots\ldots \quad 5)$$

Man gelangt zu diesem Ausdruck auch durch die Überlegung, daß der bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung während der Zeit t zurückgelegte Weg s gleich dem Wege sein muß, den der Körper zurücklegen würde, wenn er sich gleichförmig mit der mittleren Geschwindigkeit $\left(\frac{v + c}{2}\right)$ bewegte.

Setzt man den sich aus Gl. 4) ergebenden Wert:

$$t = \frac{v - c}{p}$$

in Gl. 5) ein, so folgt:

$$s = \left(\frac{v + c}{2}\right) \cdot \left(\frac{v - c}{p}\right) = \frac{v^2 - c^2}{2p} \quad \ldots\ldots \quad 6)$$

Man erhält für den Weg s noch weitere Ausdrücke, indem man die Gl. 4) für v bezw. für c auflöst und die sich ergebenden Werte in Gl. 5) einsetzt.

Nach Gl. 4) ist:

$$v = c + pt$$

Durch Einsetzung dieses Wertes in Gl. 5) wird dann:

$$s = \left(\frac{c + pt + c}{2}\right) t = ct + \frac{pt^2}{2} \quad \ldots\ldots \quad 7)$$

Nach Gl. 4) ist ferner:

$$c = v - pt$$

Durch Einsetzung dieses Wertes in Gl. 5) entsteht:

$$s = \left(\frac{v + v - pt}{2}\right) t = vt - \frac{pt^2}{2} \quad \ldots\ldots \quad 8)$$

Die beiden letzten Ausdrücke für s (Gl. 7 und 8) ergeben sich geometrisch auch direkt aus Fig. 4, indem man das Trapez ABCD einmal auffaßt als Summe des Rechteckes ABED und des Dreieckes CDE; ein anderes Mal als Differenz des Rechteckes ABCF und des Dreieckes CDF. Es ist nämlich:

$$CE = DF = v - c = pt$$

folglich:

$$\triangle CDE = \triangle CDF = pt\frac{t}{2} = \frac{pt^2}{2}$$

Setzt man in den Gl. 4) bis 7) $c = 0$, so erhält man für die gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit $= 0$:

$$p = \frac{v}{t} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

$$s = \frac{v}{2}t \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

$$s = \frac{v^2}{2p} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

$$s = \frac{pt^2}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 12)$$

Die graphische Darstellung der Bewegung für diesen Fall ist ein Dreieck ($\triangle CDE$ in Fig. 4).

Aufgabe 1. Welchen Weg legt eine Lokomotive in 24 min. zurück, wenn sie sich mit einer Geschwindigkeit von 12 m in der sec. gleichmäßig fortbewegt?

Auflösung. Gegeben ist:

$$c = 12 \text{ m}$$

und:

$$t = 24 \text{ min.} = 24 \,.\, 60 = 1440 \text{ sec.}$$

also nach Gl. 1):

$$s = 12 \,.\, 1440 = 17\,280 \text{ m}$$

Aufgabe 2. Welche mittlere Geschwindigkeit hat eine Lokomotive, welche in der Stunde 60 km zurücklegt?

Auflösung. Gegeben ist:

$$t = 60 \,.\, 60 = 3600 \text{ sec.}$$

und:

$$s = 60 \text{ km} = 60\,000 \text{ m}$$

folglich ist nach Gl. 2):

$$c = \frac{60\,000}{3600} = 16^2/_3 \text{ m}$$

Aufgabe 3. Wenn die Geschwindigkeit des Lichtes zu 40 000 Meilen, die Entfernung der Erde von der Sonne zu 21 Millionen Meilen angenommen wird, wie lange braucht dann ein Lichtstrahl, um von der Sonne zur Erde zu gelangen?

Auflösung. Nach Gl. 1) ist:

$$t = \frac{s}{c} = \frac{21\,000\,000}{40\,000} = 525 \text{ sec.} = 8 \text{ min. } 45 \text{ sec.}$$

Aufgabe 4. Der Mond braucht zu seiner Bahn um die Erde rund 28 Tage. Wie groß ist die Geschwindigkeit desselben, wenn die Entfernung des Mondes von der Erde zu 50 000 Meilen angenommen wird?

Auflösung.

$$1 \text{ Tag} = 24 \,.\, 60 \,.\, 60 = 86\,400 \text{ sec.}$$

$$t = 28 \text{ Tage} = 28 \,.\, 86\,400 = 2\,419\,200 \text{ sec.}$$

Der Umfang der Mondbahn ist:

$$s = 2 r \pi = 2 \,.\, 50\,000 \,.\, 3{,}14 = 314\,000 \text{ Meilen}$$

folglich nach Gl. 2):

$$c = \frac{314\,000}{2\,419\,200} = \backsim 0{,}13 \text{ Meilen}$$

Aufgabe 5. Eine Dampfmaschine macht $n = 50$ Umdrehungen in der min., der Kurbelhalbmesser ist $r = 0{,}4$ m. Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit des Kurbelzapfens?

Auflösung. Nach Gl. 3) ist:

$$c = \frac{2 \,.\, 0{,}4 \,.\, 3{,}14 \,.\, 50}{60} = \backsim 2{,}1 \text{ m}$$

Aufgabe 6. Ein Körper, welcher sich mit der Beschleunigung $p = 1$ m bewegt, habe die Anfangsgeschwindigkeit $c = 2$ m, die Endgeschwindigkeit $v = 10$ m. Welche Zeit braucht derselbe zu der Bewegung, und wie groß ist der durchlaufene Weg?

Auflösung. Nach Gl. 4) ist:

$$t = \frac{v - c}{p} = \frac{10 - 2}{1} = 8 \text{ sec.}$$

ferner nach Gl. 5):

$$s = \frac{10 + 2}{2} \,.\, 8 = 48 \text{ m}$$

oder auch z. B. nach Gl. 7):

$$s = 2 \,.\, 8 + \frac{1 \,.\, 8^2}{2} = 48 \text{ m}$$

Aufgabe 7. Ein Eisenbahnzug habe in einem bestimmten Augenblicke eine Geschwindigkeit von 15 m. Er werde so gebremst, daß seine Geschwindigkeit in jeder sec. um 0,5 m abnimmt. Wie groß ist die Geschwindigkeit nach 24 sec. und wie groß der während dieser Zeit zurückgelegte Weg?

Auflösung. Gegeben ist:

$$t = 24$$
$$c = 15$$
$$p = -0{,}5$$

folglich nach Gl. 4):

$$v = c + p t = 15 - 0{,}5 \,.\, 24 = 3 \text{ m}$$

und nach Gl. 5):

$$s = \frac{3 + 15}{2} \,.\, 24 = 216 \text{ m}$$

Aufgabe 8. Ein Körper bewege sich mit der Geschwindigkeit $c = 6$ m von einem Punkte A geradlinig und mit der Beschleunigung $p = 0{,}2$ m nach dem Punkte B, wo er mit der Geschwindigkeit $v = 20$ m ankommt. Wie groß ist die Entfernung der Punkte A und B voneinander?

Auflösung. Nach Gl. 6) ist:

$$s = \frac{20^2 - 6^2}{2 \,.\, 0{,}2} = 910 \text{ m}$$

Aufgabe 9. Eine Lokomotive hat in einem bestimmten Augenblicke eine Geschwindigkeit von 5 m und setzt dann ihre Bewegung mit 0,6 m Beschleunigung 16 sec. lang fort. Welchen Weg hat sie während dieser Zeit zurückgelegt?

Auflösung. Nach Gl. 7) ist:

$$s = 5 . 16 + \frac{0,6 . 16^2}{2} = 156,8 \text{ m}$$

Aufgabe 10. Welche Beschleunigung erhält eine Granate in dem Laufe eines 11,2 m langen Geschützrohres, wenn sie mit einer Geschwindigkeit von ~ 800 m an der Mündung ankommt, und wie lange dauert die Bewegung in demselben?

Auflösung. Da hier die Anfangsgeschwindigkeit = Null ist, so erhält man aus Gl. 11):

$$p = \frac{v^2}{2s} = \frac{800^2}{2 . 11,2} = \sim 28\,500 \text{ m}$$

Diese große Beschleunigung entspricht jedoch der Zeit von 1 sec. In Wirklichkeit steht das Geschoß unter Einwirkung der Pulvergase nur während einer Zeit nach Gl. 9):

$$t = \frac{v}{p} = \frac{800}{28\,500} = \sim \frac{1}{36} \text{ sec.}$$

Die erzeugte Geschwindigkeit beträgt daher auch nur $\frac{28\,500}{36} = \sim 800$ m.

Aufgabe 11. Ein Stein braucht 3,5 Sekunden, um einen 60 m tiefen Schacht zu durchfallen. Wie groß ist die Beschleunigung?

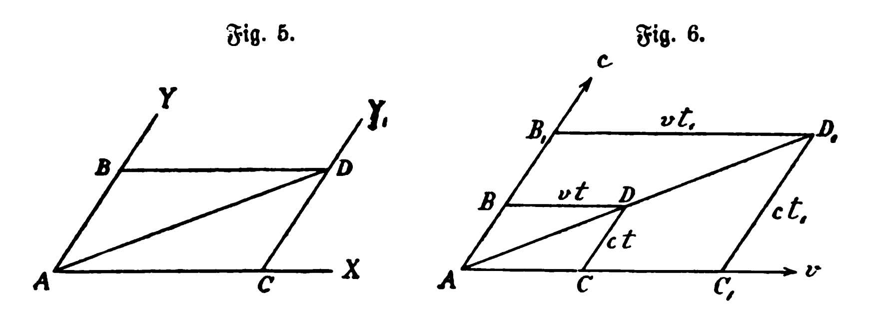
Auflösung. Nach Gl. 12) ist:

$$p = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 . 60}{3,5^2} = \sim 9,8 \text{ m (Beschleunigung der Schwere).}$$

2. Zusammengesetzte Bewegungen.

Bewegt sich ein Massenpunkt in einer bestimmten Richtung, während der Körper, auf dem sich derselbe befindet oder dem er angehört, gleichzeitig sich in einer anderen Richtung bewegt, so führt der Massenpunkt in Wirklichkeit eine Bewegung aus, die sich aus jenen beiden Einzelbewegungen zusammensetzt.

Es sei der Punkt A (Fig. 5) der Ausgangspunkt der Bewegung, AY die Bahnlinie des Massenpunktes, AX die Bahnlinie des Körpers. In einer be-



stimmten Zeit t habe sich der Körper von A nach C bewegt; es ist dann inzwischen die Bahnlinie AY aus der ursprünglichen Lage in die neue der AY parallele Lage CY_1 gekommen. Gleichzeitig aber habe der Massenpunkt die

Strecke AB zurückgelegt, welche daher auf der neuen Lage CY_1 abzutragen ist ($CD = AB$). Der Endpunkt D ist dann der Ort, welchen der Massenpunkt nach t Sekunden wirklich erreicht hat. D ist der dem Anfangspunkte A der Bewegung gegenüber liegende Eckpunkt eines Parallelogramms, welches aus den beiden Strecken AB und AC konstruiert ist.

Als Beispiel kann die Bewegung eines Menschen auf einem Schiffe angeführt werden.

Sind die beiden Einzelbewegungen (Seitenbewegungen) AB und AC geradlinig und gleichförmig, so ist die wirklich ausgeführte Bewegung AD (die resultierende oder Mittelbewegung) ebenfalls geradlinig und gleichförmig.

Zum Beweise bestimme man die Punkte D und D_1, welche der Massenpunkt nach t bezw. t_1 Sekunden erreicht hat (Fig. 6). Sind c und v die Geschwindigkeiten der beiden gleichförmigen Seitenbewegungen, so ist D der dem Punkte A gegenüber liegende Eckpunkt eines aus den Längen $AB = ct$ und $AC = vt$ konstruierten Parallelogramms. Ebenso ist D_1 der dem Punkte A gegenüber liegende Eckpunkt eines aus den Längen $AB_1 = ct_1$ und $AC_1 = vt_1$ konstruierten Parallelogramms.

Aus Fig. 6 folgt:

$$\frac{AC}{CD} = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c}; \quad \frac{AC_1}{C_1D_1} = \frac{vt_1}{ct_1} = \frac{v}{c}$$

Also auch:

$$\frac{AC}{CD} = \frac{AC_1}{C_1D_1} = \frac{v}{c}$$

d. h. die Punkte ADD_1 liegen in einer geraden Linie. Aus Fig. 6 folgt ferner:

$$\frac{AD}{AD_1} = \frac{CD}{C_1D_1} = \frac{ct}{ct_1} = \frac{t}{t_1}$$

oder in Worten: Bei der Mittelbewegung verhalten sich die zurückgelegten Wege wie die dabei verflossenen Zeiten. Die Mittelbewegung muß daher ebenfalls geradlinig und gleichförmig sein; die Geschwindigkeit w derselben wird dargestellt durch die Diagonale eines aus den Seitengeschwindigkeiten c und v konstruierten Parallelogramms.

Fallen die Bewegungsrichtungen in dieselbe Gerade, so ist die Mittelgeschwindigkeit gleich der Summe der Seitengeschwindigkeiten, wenn die Bewegungen gleiche Richtung; dagegen gleich der Differenz der Seitengeschwindigkeiten, wenn die Bewegungen entgegengesetzte Richtung haben. Stehen die Seitengeschwindigkeiten c und v rechtwinklig aufeinander (Fig. 7), so ist die Mittelgeschwindigkeit:

$$w = \sqrt{c^2 + v^2}$$

Die Richtung von w ergibt sich aus:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c}{v}$$

Fig. 7.

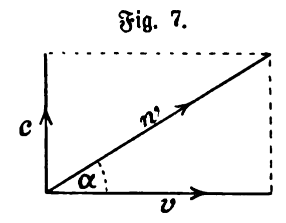
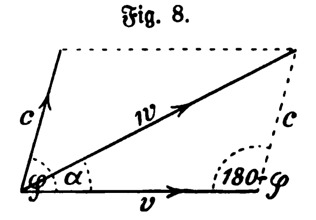


Fig. 8.



Bilden die Seitengeschwindigkeiten den beliebigen Winkel φ miteinander (Fig. 8), so wird:

$$w^2 = c^2 + v^2 - 2\,c\,v\cos(180 - \varphi)$$

also:

$$w = \sqrt{c^2 + v^2 + 2\,c\,v\cos\varphi}$$

Die Richtung von w folgt aus:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin(180 - \varphi)} = \frac{c}{w}$$

oder:

$$\sin\alpha = \frac{c\sin\varphi}{w}$$

Umgekehrt kann man auch jede gegebene Geschwindigkeit als zusammengesetzt ansehen und dieselbe durch Parallelogrammkonstruktion in zwei Seitengeschwindigkeiten von gegebener Richtung zerlegen.

Genau in derselben Weise wie die gleichförmigen Bewegungen werden die gleichförmig beschleunigten (oder verzögerten) Bewegungen durch Parallelogrammkonstruktion zusammengesetzt bezw. zerlegt.

Die aus zwei gleichförmig beschleunigten Einzelbewegungen zusammengesetzte Mittelbewegung ist wieder gleichförmig beschleunigt; die Beschleunigung derselben wird dargestellt durch die Diagonale des aus den beiden Seitenbeschleunigungen konstruierten Parallelogramms.

Durch Zusammensetzung einer gleichförmigen mit einer gleichförmig beschleunigten Bewegung entsteht, wenn beide einen Winkel miteinander bilden, eine krummlinige (parabolische) Bewegung (vergl. § 21. Wurfbewegung). ✓

Aufgabe 12. Ein Schiff bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 3 m stromabwärts. Wie groß ist die wirkliche Geschwindigkeit w eines Menschen, welcher mit einer Geschwindigkeit von 1,2 m auf dem Verdecke des Schiffes in der Richtung stromabwärts geht? Wie groß ist die Geschwindigkeit w_1, wenn er in umgekehrter Richtung (stromaufwärts) geht?

Auflösung.

$$w = 3 + 1{,}2 = 4{,}2 \text{ m}$$
$$w_1 = 3 - 1{,}2 = 1{,}8 \text{ m}$$

Aufgabe 13. Die Geschwindigkeit eines Bootes rechtwinklig zur Stromrichtung sei $v = 3$ m; der Strom selbst fließt mit einer Geschwindigkeit $c = 4$ m. Wie groß ist die wirkliche Geschwindigkeit w des Bootes?

Auflösung.

$$w = \sqrt{c^2 + v^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ m}$$

Aufgabe 14. Ein Körper hat nach einer Richtung eine Geschwindigkeit von 6 m und zugleich nach einer anderen Richtung, die mit ersterer einen Winkel von 60° einschließt, eine Geschwindigkeit von 3 m. Es soll die Mittelgeschwindigkeit w durch Zeichnung und Rechnung bestimmt werden.

Auflösung. Werden die gegebenen Seitengeschwindigkeiten in einem passenden Maßstabe aufgetragen (Fig. 8), so kann die gesuchte Mittelgeschwindigkeit w direkt abgemessen werden.

Durch Rechnung ergibt sich:

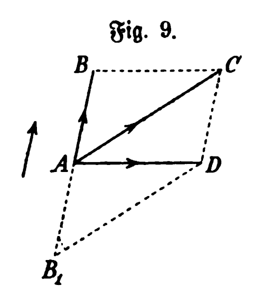
$$w = \sqrt{6^2 + 3^2 + 2 \cdot 6 \cdot 3 \cos 60^\circ} = 7{,}94 \text{ m}$$

3. Relative (scheinbare) Bewegung.

Wenn der Raum, in welchem sich ein Körper (Massenpunkt) bewegt, selbst eine fortschreitende Bewegung ausführt, so setzt sich nach 2. in diesem Paragraphen die wirkliche oder wahre Bewegung des Körpers aus jenen beiden Einzelbewegungen zusammen.

Konstruiert man also (Fig. 9) aus der Bewegung AB des fortschreitenden Raumes und der Bewegung AD des Körpers in dem Raume ein Parallelogramm, so stellt die Diagonale AC desselben die wahre Bewegung des Körpers dar.

Fig. 9.



Die Bewegung AD des Körpers in bezug auf den bewegten Raum heißt die relative oder scheinbare Bewegung, da einem in dem Raume befindlichen Beobachter nur diese Bewegung zu erfolgen scheint. Im Gegensatz dazu nennt man die wirklich ausgeführte Bewegung AC die wahre oder absolute Bewegung.

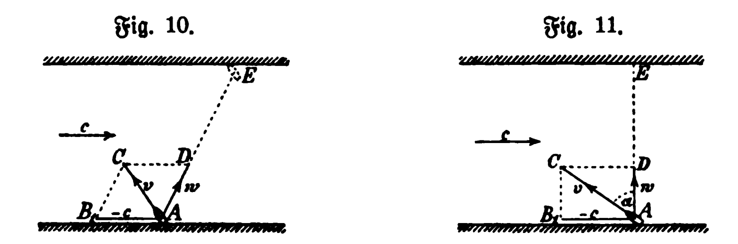
Häufig liegt die Aufgabe vor, aus der absoluten Bewegung und der Bewegung des fortschreitenden Raumes die relative Bewegung zu bestimmen. Man hätte dann (Fig. 9) ein Parallelogramm zu konstruieren aus der Diagonalen AC (der absoluten Bewegung) und einer Seite AB (der Bewegung des Raumes). Die andere Seite AD des Parallelogramms stellt dann die gesuchte relative Bewegung dar.

Statt dessen kann man aber auch AD als Diagonale des Parallelogramms AB_1DC betrachten, dessen eine Seite AC die absolute Bewegung, dessen andere Seite AB_1 das entgegengesetzte der Bewegung des fortschreitenden Raumes ist.

Für gleichförmige Bewegungen mit konstanten Geschwindigkeiten erhält man danach zur Bestimmung der relativen Geschwindigkeit die Regel:

Man konstruiere aus der absoluten Geschwindigkeit und der entgegengesetzt (negativ) genommenen Geschwindigkeit des fortschreitenden Raumes ein Parallelogramm. Die Diagonale desselben stellt die gesuchte relative Geschwindigkeit dar.

Soll z. B. ein Boot über einen Fluß gerudert werden, in dem das Wasser mit der Geschwindigkeit c fließt (Fig. 10), so muß dasselbe, um von dem Punkte A nach dem Punkte E zu gelangen, die Richtung AC erhalten,



welche sich ergibt, wenn man aus der wahren Geschwindigkeit $w = AD$ und aus $-c = AB_1$ das Parallelogramm AB_1CD konstruiert.

Liegt (Fig. 11) der Punkt E dem Punkte A gerade gegenüber (also $\sphericalangle B_1AE = 90^0$), so wird:

$$v = \sqrt{w^2 + c^2}$$

Aufgabe 15. Ein Boot soll rechtwinklig über einen Strom von $s = 600$ m Breite gerudert werden, dessen Wassergeschwindigkeit $c = 0{,}8$ m beträgt. Die Überfahrt soll in $t = 5$ min. bewerkstelligt werden. Wie groß muß die relative Geschwindigkeit v sein, und welche Richtung muß das Boot erhalten? (Fig. 11.)

Auflösung. Die wahre Geschwindigkeit für die Überfahrt ergibt sich:

$$w = \frac{s}{t} = \frac{600}{5 \cdot 60} = 2 \text{ m}$$

folglich:

$$v = \sqrt{w^2 + c^2} = \sqrt{2^2 + 0{,}8^2} = 2{,}15 \text{ m}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c}{w} = \frac{0{,}8}{2} = 0{,}4$$

$$\alpha = 21^0\, 50' = \backsim 22^0$$

Sind die Bewegungen gleichförmig beschleunigt, so ist zur Ermittelung der relativen Bewegung die oben angegebene Parallelogrammkonstruktion in derselben Weise, aber mit den Beschleunigungen statt mit den Geschwindigkeiten auszuführen.

Ein weiteres Beispiel für relative Bewegung bietet die Bewegung des Wassers in einem Turbinenrade. Der fortschreitende Raum ist hier das Laufrad der Turbine, welches eine gleichförmige Drehbewegung ausführt. Jedes Wasserteilchen bewegt sich im Rade scheinbar (relativ) der Schaufelform entsprechend, während in Wirklichkeit die wahre (absolute) Bewegung desselben sich in jedem Augenblick aus beiden Einzelbewegungen zusammensetzt.

§ 4.

Physikalische Grundgesetze.

1. Das Gesetz der Trägheit (Galiläi 1638).

Jeder Körper bleibt im Zustande der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, solange er nicht durch äußere Kräfte zu einer Änderung dieses Zustandes gezwungen wird.

Eine Kraft von sehr kurzer Wirkungsdauer (eine sogen. Momentankraft) erteilt bei genügender Stärke einem vorher ruhenden Körper eine gleichförmig geradlinige Bewegung, die dem Trägheitsgesetz zufolge unverändert fortdauern müßte, wenn sie nicht durch Gegenkräfte (Widerstände) schließlich aufgehoben würde.

Erhält z. B. ein Schlitten auf einer Eisfläche einen Stoß, so würde derselbe sich gleichförmig und geradlinig endlos fortbewegen, wenn ihn nicht schließlich die Reibung und der Luftwiderstand zum Stillstand brächte. Um aber den Schlitten in seiner Bewegung plötzlich aufzuhalten oder auch von seiner geradlinigen Bahn abzulenken, dazu bedarf es immer einer äußeren Kraft.

Durch eine nach Größe und Richtung gleichbleibende (sogen. konstante) Kraft erhält ein Körper eine geradlinige, gleichförmig beschleunigte Bewegung, und zwar ist die Beschleunigung der Bewegung um so größer, je größer die Kraft ist. Wirken nacheinander zwei Kräfte auf einen Körper von derselben Masse und erteilen diesem die nämliche Beschleunigung, so nimmt man die Kräfte als einander gleich an. Man betrachtet dagegen eine Kraft als n mal so groß wie eine andere, wenn sie einer und derselben Masse eine n mal so große Beschleunigung erteilt als die andere Kraft.

1. Die Kräfte verhalten sich also wie die Beschleunigungen, welche sie einer und derselben Masse erteilen.

Man nennt zwei Massen einander gleich, wenn sie durch dieselbe Kraft gleiche Beschleunigungen erhalten. Die Masse eines Körpers bezeichnet man als um so größer, je kleiner die Beschleunigung ist, welche ihr von einer bestimmten Kraft erteilt wird. Eine Masse heißt n mal so groß als eine andere, wenn sie durch dieselbe Kraft eine n mal kleinere Beschleunigung erhält; oder wenn sie durch eine n mal größere Kraft dieselbe Beschleunigung erhält als die andere Masse.

2. Die Massen verhalten sich also umgekehrt wie die Beschleunigungen, welche gleiche Kräfte ihnen erteilen; oder:

3. Die Massen verhalten sich wie die Kräfte, durch welche sie gleiche Beschleunigungen erhalten.

Um die Größen der Kräfte durch Zahlen ausdrücken zu können, hat man dieselben auf eine bestimmte Krafteinheit zu beziehen. Am gebräuchlichsten ist es, das Gewicht eines Körpers, welcher 1 kg wiegt, als Krafteinheit anzunehmen.

Als Masseneinheit gilt die Masse eines Körpers, welcher durch die Krafteinheit ein Meter Beschleunigung erhält. Eine m mal so große Masse würde durch die Krafteinheit eine m mal so kleine Beschleunigung erhalten, also die Beschleunigung $\frac{1}{m}$. Da sich nun die Kräfte verhalten wie die Beschleunigungen, welche sie einer und derselben Masse erteilen, so wird eine Kraft P der Masse m eine P mal so große Beschleunigung erteilen als die Krafteinheit, folglich die Beschleunigung $\frac{P}{m}$. Danach erhält man folgende Zusammenstellung:

Die Kraft 1 erteilt der Masse 1 die Beschleunigung 1
" " 1 " " " m " " $\frac{1}{m}$
" " P " " " m " " $\frac{P}{m}$

Bezeichnet man die Beschleunigung mit p, so ist allgemein:

$$p = \frac{P}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 13)$$

oder in Worten:

$$\textbf{Beschleunigung} = \frac{\textbf{Kraft}}{\textbf{Masse}}$$

Wird die Kraft = Null, so wird auch die Beschleunigung = Null, d. h. der Bewegungszustand des Körpers ändert sich ohne Einwirkung der Kraft nicht.

2. Das Gesetz der Schwere (Newton 1680).

Die Gewichte der Körper sind Kräfte, welche allen Körpern die gleiche Beschleunigung erteilen, nämlich:

$$\mathbf{g = 9{,}81\ m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 14)$$

Diese Größe heißt die Beschleunigung der Schwere oder des freien Falles.

Streng genommen ist die Fallbeschleunigung g nicht konstant, sondern abhängig von der geographischen Breite φ und von der Höhe h des Ortes über dem Meeresspiegel. Genau ist:

$$g = (9{,}7806 + 0{,}0503 \sin^2 \varphi) \cdot (1 - 0{,}00000032\ h)$$

Z. B. ist am Äquator ($\varphi = 0$) und in der Höhe der Meeresfläche ($h = 0$):

$$g = \backsim 9{,}781\ m$$

an den Polen ($\varphi = 90^0$) für $h = 0$:

$$g = \backsim 9{,}831\ m$$

Für Karlsruhe ist $\varphi = 49^0\,1'$ und $h = 117$ m, folglich:

$$g = 9{,}8089 = \backsim 9{,}81\ m$$

Bezeichnet man das Gewicht der Masse m mit G, so folgt aus Gl. 13):

$$g = \frac{G}{m}$$

$$m = \frac{G}{g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

oder in Worten:

$$\textbf{Masse} = \frac{\textbf{Gewicht}}{\textbf{Fallbeschleunigung}}$$

Gl. 15) läßt erkennen, daß man die Gewichtszahl G durch $g = 9{,}81$ zu dividieren hat, um die Massenzahl zu erhalten. Wenn also (wie vorhin schon geschehen) 1 kg als Gewichtseinheit (Krafteinheit) angenommen wird, so ergibt sich als Masseneinheit danach die Masse eines Körpers, welcher 9,81 kg wiegt.

Für eine Masse m_1, deren Gewicht G_1 ist, gilt ebenso nach Gl. 15):

$$m_1 = \frac{G_1}{g}$$

Durch Division beider Gleichungen erhält man:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{G_1}{G}$$

oder in Worten: Die Massen der Körper verhalten sich wie ihre Gewichte.

Um die Massen zweier Körper miteinander zu vergleichen, braucht man daher nur deren Gewichte vermittelst einer Wage zu bestimmen.

Aufgabe 16. Durch eine Kraft $P = 30$ kg erhält ein Körper eine Beschleunigung $p = 1{,}8$ m. Wie groß ist die Beschleunigung p_1, welche demselben Körper durch eine Kraft $P_1 = 20$ kg erteilt wird?

Auflösung. Nach Satz 1. S. 14:

$$\frac{P_1}{P} = \frac{p_1}{p}$$

also:

$$p_1 = \frac{P_1}{P} p = \frac{20}{30} 1{,}8 = 1{,}2 \text{ m}$$

Aufgabe 17. Ein Körper von der Masse m erhält durch eine gewisse Kraft die Beschleunigung $p = 2$ m; dieselbe Kraft erteilt einem zweiten Körper von der Masse m_1 die Beschleunigung $p_1 = 5$ m. In welchem Verhältnis stehen die Massen m und m_1 zueinander?

Auflösung. Nach Satz 2. S. 14:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{p}{p_1} = \frac{2}{5} \text{ oder: } m_1 = \frac{2}{5} m$$

Aufgabe 18. Wie groß ist die Masse m_1 eines Körpers, wenn demselben durch eine Kraft $P_1 = 75$ kg dieselbe Beschleunigung p erteilt wird, die ein anderer Körper von der Masse $m = 15$ durch eine Kraft $P = 50$ kg erhält?

Auflösung. Nach Satz 3. S. 14:

$$\frac{m_1}{m} = \frac{P_1}{P}$$

oder:

$$m_1 = \frac{P_1}{P} m = \frac{75}{50} 15 = 22,5$$

Aufgabe 19. Welche Kraft P ist (bei Vernachlässigung aller Reibungen und Widerstände) erforderlich, um einer Masse $m = 20$ eine Beschleunigung $p = 3,5$ m zu erteilen?

Auflösung. Nach Gl. 13) S. 15:

$$P = pm = 3,5 \cdot 20 = 70 \text{ kg}$$

Aufgabe 20. Wie groß ist die Masse m eines Körpers, welcher 35,3 kg wiegt?

Auflösung. Nach Gl. 15) S. 16:

$$m = \frac{G}{g} = \frac{35,3}{9,81} = \sim 3,6$$

Aufgabe 21. Die Masse m eines Körpers sei bestimmt durch die Zahl 12. Wie groß ist das Gewicht desselben?

Auflösung.

$$G = mg = 12 . 9,81 = 117,72 \text{ kg}$$

3. Das Gesetz der Gegenwirkung (Reaktionsgesetz).

Die Erfahrung lehrt, daß die Kräfte in der Natur nie einzeln auftreten, sondern daß jede Kraft ihre Gegenkraft hat. Kraft und Gegenkraft wirken stets in derselben geraden Linie, haben gleiche Größe, aber entgegengesetzte Richtung.

In einzelnen Fällen läßt sich dieses Gesetz sofort klar erkennen.

Der Druck eines Körpers A auf einen Körper B ruft den gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Druck des Körpers B auf den Körper A hervor.

Wenn jemand eine Last fortzieht, so wird er seinerseits mit der gleichen Kraft nach der Last hingezogen.

Ein in seinen Endpunkten unterstützter, durch senkrechte Kräfte belasteter wagerechter Balken (Fig. 82) übt auf jeden der Unterstützungspunkte einen senkrecht abwärts gerichteten Druck, den sogen. Auflagerdruck, aus; umgekehrt erfährt der Balken durch die Unterstützungspunkte die gleichen, aber entgegengesetzt, also lotrecht aufwärts gerichteten Drücke (Stützenwiderstände).

Aber auch in anderen Fällen, die sich der unmittelbaren Beobachtung entziehen, findet sich das Gesetz der Gegenwirkung bestätigt; so z. B. hat die Kraft, mit welcher die Erde von der Sonne angezogen wird, genau dieselbe Größe als die (entgegengesetzt gerichtete) Kraft, mit welcher ihrerseits die Sonne von der Erde angezogen wird.

Überall in der Natur haben Druck und Gegendruck, Zug und Gegenzug dieselbe Größe, aber umgekehrte Richtung.

4. Das Parallelogrammgesetz.

Wenn gleichzeitig mehrere Kräfte auf einen Körper wirken, so ist die Bewegung desselben die Resultierende aller derjenigen Bewegungen, welche der Körper ausführen würde, wenn jede der Kräfte einzeln auf ihn einwirkte.

Auf diesem allgemeinen Gesetze beruht der Lehrsatz von dem Parallelogramm der Kräfte. Derselbe lautet:

Wirken zwei Kräfte auf einen Körper, so stellt die Diagonale des aus den beiden Kräften konstruierten Parallelogramms ihrer Größe und Richtung nach die Mittelkraft oder Resultierende dar.

Umgekehrt kann jede Kraft als Mittelkraft aufgefaßt und durch Parallelogrammkonstruktion in zwei Seitenkräfte oder Komponenten von gegebener Richtung zerlegt werden.

Die Zusammensetzung gegebener Kräfte zu einer Mittelkraft bezw. die Zerlegung einer gegebenen Kraft in zwei der Richtung nach bestimmte Seitenkräfte geschieht nach denselben Regeln wie die Zusammensetzung oder Zerlegung der Geschwindigkeiten (§ 3, S. 9). Jede Kraft wird dabei dargestellt durch eine gerade Linie, welche so viele Längeneinheiten enthält als die betreffende Kraft Krafteinheiten.

Wirken die Seitenkräfte in einer geraden Linie und nach derselben Richtung, so ist die Mittelkraft gleich der Summe derselben.

Wirken zwei Seitenkräfte in einer geraden Linie, aber nach entgegengesetzten Richtungen, so ist die Mittelkraft gleich der Differenz derselben und hat die Richtung der größeren. Sind die beiden Seitenkräfte einander gleich, so ist die Mittelkraft gleich Null; die Seitenkräfte halten sich einander im Gleichgewicht.

Fig. 12.

Sind mehr als zwei in derselben Geraden, aber nach entgegengesetzten Richtungen wirkende Kräfte vorhanden, so läßt sich dieser Fall auf den vorigen zurückführen, indem man alle nach einer Richtung hin wirkenden Kräfte zu einer, alle nach der entgegengesetzten Richtung hin wirkenden Kräfte zu einer anderen Kraft durch Summierung zusammenfaßt.

Sollen zwei Kräfte P_1 und P_2, deren Richtungen einen rechten Winkel miteinander bilden, zu einer Mittelkraft R vereinigt werden (Fig. 12), so ergibt sich deren Größe durch Rechnung aus:

$$R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

Die Richtung von R wird bestimmt durch:

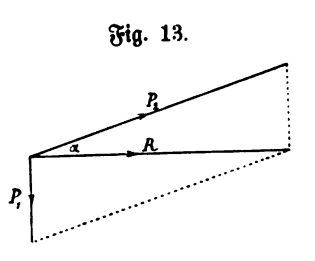
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_1}{P_2}$$

Ist umgekehrt eine gegebene Kraft R in zwei Seitenkräfte P_1 und P_2 so zu zerlegen, daß diese rechtwinklig zueinander gerichtet sind, und ist der Winkel, welchen P_2 und R miteinander bilden, $= \alpha$ (Fig. 12), so wird:

$$P_1 = R \sin \alpha$$
$$P_2 = R \cos \alpha$$

Soll bei der Zerlegung die eine Seitenkraft P_1 senkrecht zu R gerichtet sein, während die andere P_2 den Winkel α mit der Kraft R bildet (Fig. 13), so wird:

Fig. 13.



$$P_1 = R \operatorname{tg} \alpha$$

$$P_2 = \frac{R}{\cos \alpha}$$

Bildet jede der Seitenkräfte den gleichen Winkel α mit der Kraft R (ein Fall, der z. B. bei einer Kniehebelpresse vorkommt), so werden die Seitenkräfte einander gleich. Man erhält (Fig. 14):

Fig. 14.

$$P_1 = P_2 = \frac{R}{2 \cos \alpha}$$

Sind mehrere in einer Ebene auf einen Punkt wirkende Kräfte $P_1 P_2 P_3 \ldots$ zu einer Mittelkraft zu vereinigen, so fasse man zunächst zwei derselben, z. B. P_1 und P_2 durch Parallelogrammkonstruktion zu einer Mittelkraft R_1 zusammen; bilde sodann aus R_1 und P_3 die Mittelkraft R_2; weiter aus R_2 und P_4 die Mittelkraft R_3 u. s. f.



Die Aufgabe, eine Kraft R in mehr als zwei Seitenkräfte von gegebenen Richtungen zu zerlegen, dagegen ist unbestimmt, da unendlich viele Lösungen möglich sind.

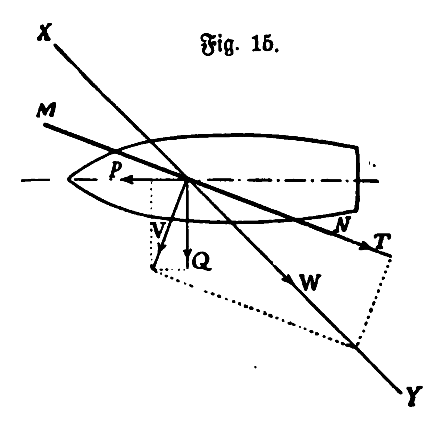


Fig. 15.

Ein Beispiel der Kräftezerlegung bietet ein kreuzendes Schiff (Fig. 15). Ist X Y die Windrichtung und M N das Segel, so zerlegt sich die Windkraft W zunächst in die Seitenkräfte T in der Richtung des Segels und V rechtwinklig dazu. Nur diese letztere Kraft V kann eine Wirkung auf das Segel hervorbringen.

Zerlegt man dieselbe weiter in die Seitenkräfte P in der Richtung des Schiffes und Q rechtwinklig dazu, so ist P diejenige Kraft, durch welche das

Schiff vorwärts bewegt wird, während die Kraft Q eine (wegen des großen Wasserwiderstandes geringe) Seitenbewegung, die sogen. Trift, erzeugt.

Aufgabe 22. In einer geraden Linie und nach derselben Richtung wirken die Kräfte $P_1 = 20$ kg, $P_2 = 35$ kg, $P_3 = 42$ kg. Wie groß ist die Mittelkraft R?

Auflösung.

$$R = 20 + 35 + 42 = 97 \text{ kg}$$

Aufgabe 23. In derselben Geraden wirken die Kräfte 48, 30, 16 kg nach rechts, die Kräfte 15, 13, 8 kg nach der entgegengesetzten Richtung. Ges.: Mittelkraft R.

Auflösung.

$$R = 48 + 30 + 16 - (15 + 13 + 8) = 58 \text{ kg}$$

Die Richtung von R ist nach rechts, weil die Summe der Kräfte nach dieser Richtung die größere ist.

Aufgabe 24. Zwei rechtwinklig zu einander gerichtete Kräfte $P_1 = 30$ kg und $P_2 = 60$ kg (Fig. 12) wirken auf einen Körper, dessen Gewicht $G = 20$ kg ist. Wie groß ist die Mittelkraft R; welchen Winkel α schließt dieselbe mit P_1 ein, und wie groß ist die Beschleunigung p, welche der Körper durch die Einwirkung der Kraft R erfährt?

Auflösung. Trägt man die Kräfte P_1 und P_2 als gerade Linien in einem passenden Maßstabe (z. B. 1 kg = 1 mm) auf, so findet man durch Messung oder Rechnung:

$$R = 67{,}1 \text{ kg}$$

Aus $\operatorname{tg}\alpha = \frac{30}{60} = 0{,}5$ folgt:

$$\alpha = 26^\circ 30'$$

Die gesuchte Beschleunigung ist nach Gl. 13) S. 15:

$$p = \frac{R}{m} = \frac{Rg}{G} = \frac{67{,}1 \,.\, 9{,}81}{20} = 32{,}9 \text{ m}$$

Aufgabe 25. Es soll von zwei sich unter $\varphi = 60^\circ$ schneidenden Kräften $P_1 = 50$ kg und $P_2 = 40$ kg die Mittelkraft R durch Konstruktion gefunden werden.

Auflösung.

$$R = 78{,}1 \text{ kg}$$

Dasselbe findet man rechnerisch aus der Gleichung:

$$R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1 \,.\, P_2 \,.\, \cos\varphi} = \sqrt{50^2 + 40^2 + 2 \,.\, 50 \,.\, 40 \,.\, \cos 60^\circ}$$

Aufgabe 26. Die Strebe eines Hängewerkes (Dachsparren) sei unter 40° gegen die Wagerechte geneigt. Es soll die lotrechte Seitenkraft V und die wagerechte Seitenkraft H des Strebendruckes $P = 5000$ kg durch Rechnung bestimmt werden.

Auflösung.

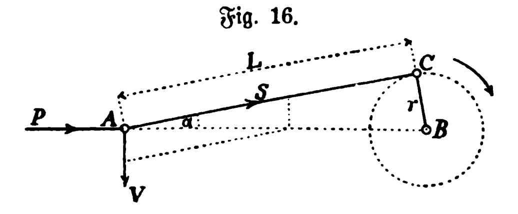
$$V = 5000 \,.\, \sin 40^\circ = 5000 \,.\, 0{,}643 = 3215 \text{ kg}$$
$$H = 5000 \,.\, \cos 40^\circ = 5000 \,.\, 0{,}766 = 3830 \text{ kg}$$

Aufgabe 27. Bei einer Dampfmaschine sei die Länge der Kurbel $r = 40$ cm, die Länge der Schubstange $L = 5 \,.\, 40 = 200$ cm und der Druck, welcher durch die Kolbenstange auf den Kreuzkopf übertragen wird, $P = 6280$ kg. Wie groß ist der Druck S, den die Schubstange erhält; wie groß der Druck V, mit welchem der Kreuzkopf gegen die Gleitbahn gepreßt wird, in dem Augenblicke, wo die Kurbel rechtwinklig gegen die Schubstange steht? (Fig. 16.) Wie groß sind die größten Werte von S und V?

Auflösung. Durch Zerlegung von P nach den Richtungen AC und rechtwinklig zu AB findet man allgemein:

$$V = P \,.\, \mathrm{tg}\,\alpha; \quad S = \frac{P}{\cos\alpha}$$

Fig. 16.



Die Kräfte V und S sind nicht konstant, sondern veränderlich. Für die in Fig. 16 gezeichnete Stellung der Kurbel ergibt sich:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{r}{L} = \frac{40}{200} = 0{,}2; \text{ oder: } \alpha = 11^\circ 20'$$

Also:

$$V = 6280 \,.\, 0{,}2 = 1256 \text{ kg}$$

$$S = \frac{6280}{0{,}981} = \backsim 6402 \text{ kg}$$

Die kleinsten Werte von V und S ergeben sich bei $\alpha = o$ (für die sogen. toten Punkte der Kurbel) und zwar:

$$V = 0; \quad S = P$$

Die größten Werte dagegen ergeben sich, wenn die Kurbel senkrecht steht, bei einem Winkel α_{max}. Die Größe desselben bestimmt sich aus:

$$\sin\alpha_{max} = \frac{r}{L} = 0{,}2 \text{ zu } \alpha_{max} = \backsim 11^\circ 30'$$

Es findet sich dann:

$$V_{max} = 6280 \,.\, 0{,}203 = \backsim 1275 \text{ kg}$$

$$S_{max} = \frac{6280}{0{,}980} = \backsim 6408 \text{ kg}$$

§ 5.

Die Leistungen der Kräfte.

Um die Leistung einer Kraft zu beurteilen, muß außer der Größe (Intensität) derselben auch noch der in einer bestimmten Zeit von ihrem Angriffspunkte zurückgelegte Weg bekannt sein.

Wenn z. B. von zwei gleichen Kräften die erste derselben in einer bestimmten Zeit ein und dasselbe Gewicht doppelt so hoch als die zweite hebt, so ist die Leistung der ersten Kraft auch doppelt so groß als die der zweiten.

Allgemein nennt man das Produkt aus der Kraft und dem in der Richtung derselben zurückgelegten Wege die von der Kraft verrichtete mechanische Arbeit oder kurz:

Mechanische Arbeit = Kraft × Weg.

Wird die Kraft in **kg**, der Weg in **m** angegeben, so ist die Arbeitseinheit das **mkg**.

Befindet sich ein Körper unter Einwirkung mehrerer Kräfte, so wird derselbe im allgemeinen eine Bewegung ausführen, die von der Richtung einer dieser Kräfte wesentlich abweichen kann. Wenn trotzdem von der mechanischen Arbeit eben dieser Kraft die Rede ist, so versteht man darunter das Produkt aus der Kraft und derjenigen Wegeslänge, welche man vom Anfang der Bewegung aus gerechnet in der Kraftrichtung erhält, wenn man von dem Endpunkte der Bewegung aus eine senkrechte Linie auf die Kraftrichtung fällt.

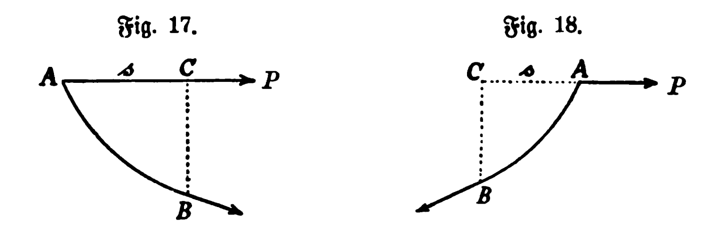


Fig. 17. Fig. 18.

Bewegt sich z. B. ein Körper unter Einwirkung mehrerer Kräfte von A nach B (Fig. 17), und ist P eine der auf ihn wirkenden Kräfte, so ist, wenn $BC \perp AC$, die von der Kraft P während dieser Bewegung verrichtete mechanische Arbeit:

$$\mathfrak{A} = P . \overline{AC} = P . s$$

In Fig. 18 ist, da der während der Bewegung von A nach B zurückgelegte Weg s der Kraftrichtung entgegengesetzt ist, also negativ in Anrechnung gebracht werden muß, die von der Kraft P verrichtete mechanische Arbeit:

$$\mathfrak{A} = -P . s$$

Bei einem mathematischen Pendel z. B. ist, wenn mit G das Gewicht der Kugel bezeichnet wird (Fig. 19), die mechanische Arbeit der Schwerkraft:

während der Bewegung AC: $\mathfrak{A}_1 = G . h$

" " " CB: $\mathfrak{A}_2 = -G . h$

und während einer ganzen Pendelschwingung AB (da die Punkte A und B in gleicher Höhe liegen):

$$\mathfrak{A} = \mathfrak{A}_1 + \mathfrak{A}_2 = \text{Null}$$

Ist die Kraft stets rechtwinklig zur Bewegungsrichtung, so ist der in ihrer Richtung zurückgelegte Weg = Null; sie verrichtet daher gar keine mechanische Arbeit. (Beispiel: Zentrifugalpendel, bei welchem die Schwerkraft die mechanische Arbeit Null verrichtet, Fig. 172.)

Es sei nun R die Mittelkraft der auf den Körper wirkenden Einzelkräfte $P_1 P_2 \ldots$ und AB die Bahnlinie des Körpers (Fig. 20).

Bei Zerlegung sämtlicher Kräfte nach beliebigen Richtungen muß dann die in eine bestimmte Richtung hineinfallende Seitenkraft von R gleich sein der

Summe der in dieselbe Richtung hineinfallenden Seitenkräfte von $P_1 P_2 \ldots$ Für die Richtung AB wird danach:

$$R \cos\alpha = P_1 \cos\alpha_1 + P_2 \cos\alpha_2 + \ldots$$

Nach Fig. 20 ist:

$$\cos\alpha = \frac{s}{AB}; \quad \cos\alpha_1 = \frac{s_1}{AB}; \quad \cos\alpha_2 = \frac{s_2}{AB}; \ldots$$

Durch Einsetzung dieser Werte in die vorige Gleichung erhält man:

$$Rs = P_1 s_1 + P_2 s_2 + \ldots \ldots \ldots \quad 16)$$

Jedes der Glieder der letzten Gleichung stellt die bei der Bewegung des Körpers von A nach B verrichtete mechanische Arbeit der betreffenden Kraft dar, und die Gleichung lautet danach in Worten:

Die mechanische Arbeit der Mittelkraft ist gleich der Summe der mechanischen Arbeiten der Einzelkräfte.

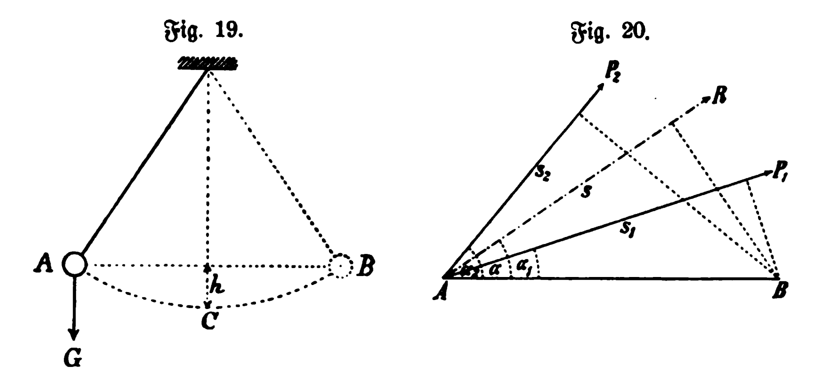


Fig. 19. Fig. 20.

Eine bestimmte mechanische Arbeit kann nun von einer Kraft in kürzerer oder längerer Zeit verrichtet werden, und es ist deshalb zur Beurteilung der ganzen Kraftleistung noch erforderlich, die verbrauchte Zeit anzugeben oder zu bestimmen, wie groß die in der Zeiteinheit (1 sec.) verrichtete mechanische Arbeit ist.

Man nennt die in 1 sec. verrichtete mechanische Arbeit den Effekt der Kraft. Da nun die mechanische Arbeit = Kraft × Weg, und der in 1 sec. zurückgelegte Weg die Geschwindigkeit ist, so kann man kurz sagen:

Effekt = Kraft × Geschwindigkeit

oder wenn der Effekt mit E, die Kraft mit P, die Geschwindigkeit mit v bezeichnet wird:

$$E = Pv \ldots \ldots \ldots \quad 17)$$

Um bei größeren Kräften und Geschwindigkeiten nicht zu große Zahlenwerte zu erhalten, hat man den Begriff der Pferdestärke oder Pferdekraft eingeführt.

Man versteht unter einer Pferdestärke einen Effekt von 75 mkg oder eine mechanische Arbeit von 75 mkg in 1 sec.

Bezeichnet man die Anzahl der Pferdestärken mit N, so ist:

$$N = \frac{E}{75} = \frac{Pv}{75} \qquad \text{18)}$$

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ist nach Gl. 3) Seite 5:

$$v = \frac{2R\pi n}{60}$$

Wird Halbmesser R in cm. eingeführt, so ergibt sich nach Einsetzung in Gl. 18):

$$N = \frac{P \cdot 2R\pi \cdot n}{75 \cdot 60 \cdot 100} = \frac{n}{71\,620} \cdot P \cdot R$$

oder:

$$P \cdot R = 71\,620 \cdot \frac{N}{n} \qquad \text{19)}$$

Für die regelmäßige tägliche Leistung lebender Wesen gilt die Formel:

$$L = Pvt$$

worin zu setzen ist:

		für einen Mann	für ein Pferd
mittlere Kraft	$P =$	10 kg	70 kg
„ Geschwindigkeit .	$v =$	0,8 m	1,25 m
„ Zeit	$t = 8$ Std. $=$	$8 \cdot 60 \cdot 60 =$	28800 sec.

Danach ist die tägliche Leistung eines Menschen:

$$L = 10 \cdot 0{,}8 \cdot 28\,800 = 230\,400 \text{ mkg}$$

die tägliche Leistung eines Pferdes:

$$L = 70 \cdot 1{,}25 \cdot 28\,800 = 2\,520\,000 \text{ mkg}$$

Häufig kann aber der Mensch oder das Pferd nicht mit mittlerer Geschwindigkeit und Zeit ausgenutzt werden; ihre Tagesleistung wird dann geringer. Ist v_1 die von der mittleren abweichende Geschwindigkeit, t_1 die neue Zeit, so ergibt sich die auszuübende Kraft P_1 nach der Formel von Gerstner:*)

$$P_1 = P\left(2 - \frac{v_1}{v}\right) \cdot \left(2 - \frac{t_1}{t}\right) \qquad \text{20)}$$

Wirkt eine konstante Kraft P auf einen Körper von der Masse m während einer Wegeslänge s, so verrichtet sie nach S. 21 die mechanische

*) Eine andere Formel (von Maschek) lautet:

$$P_1 = P\left(3 - \frac{v_1}{v} - \frac{t_1}{t}\right)$$

Die Formel von Gerstner ist jedoch im allgemeinen vorzuziehen.

Arbeit Ps. Eine konstante Kraft erzeugt nun aber nach S. 14 stets gleichförmig beschleunigte Bewegung; folglich kann, wenn c die Anfangs-, v die Endgeschwindigkeit des Körpers bedeutet, und p die Beschleunigung ist, welche derselbe durch die Kraft P erhält, nach Gl. 6) S. 6 gesetzt werden:

$$s = \frac{v^2 - c^2}{2p}$$

Nach Gl. 13) S. 15 ist aber:

$$P = mp$$

Durch Multiplikation beider Ausdrücke ergibt sich:

$$Ps = \frac{mv^2}{2} - \frac{mc^2}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 21)$$

Den Ausdruck $\frac{mv^2}{2}$ bezw. $\frac{mc^2}{2}$, d. i. halbe Masse des Körpers, multipliziert mit dem Quadrate der Geschwindigkeit, nennt man die lebendige Kraft oder Arbeitsenergie,*) welche der Körper in dem Augenblicke besitzt, wo seine Geschwindigkeit $= v$ bezw. c ist.

Hiernach ist in Gl. 21) $\frac{mv^2}{2}$ die lebendige Kraft, welche der Körper am Ende der Bewegung; $\frac{mc^2}{2}$ die lebendige Kraft, welche der Körper am Anfang der Bewegung hat. Die Differenz:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mc^2}{2}$$

gibt also die Zunahme an lebendiger Kraft an, welche der Körper während der Bewegung erfährt.

Die Gl. 21) enthält daher folgenden wichtigen Lehrsatz:

Die mechanische Arbeit, welche die auf einen Körper wirkende Kraft verrichtet, ist gleich der von ihr hervorgebrachten Zunahme an lebendiger Kraft desselben, oder kurz:

Mechanische Arbeit = Zunahme an lebendiger Kraft.

Hat der Körper die Anfangsgeschwindigkeit Null, so geht Gl. 21) über in:

$$Ps = \frac{mv^2}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 22)$$

d. h. die lebendige Kraft, welche der Körper am Ende der Bewegung besitzt, ist gleich der während der Bewegung verrichteten mechanischen Arbeit.

Wirkt die Kraft P der Bewegung entgegen, d. h. tritt sie als Widerstand auf, so wird die Bewegung gleichförmig verzögert.

---

*) Andere Bezeichnungen dafür sind: kinetische Energie, Arbeitsvermögen oder Wucht.

Die Gl. 21) nimmt dann (da der Weg s negativ einzusetzen ist) die Form an:

$$-Ps = \frac{mv^2}{2} - \frac{mc^2}{2}$$

oder:

$$Ps = \frac{mc^2}{2} - \frac{mv^2}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 23)$$

Es bezeichnet hier die Differenz:

$$\frac{mc^2}{2} - \frac{mv^2}{2}$$

die Abnahme an lebendiger Kraft, welche der Körper während der Bewegung erfährt oder die während der Bewegung verbrauchte lebendige Kraft und Gl. 23) läßt sich in Worten folgendermaßen ausdrücken:

Widerstand $\times$ Weg = verbrauchte lebendige Kraft.

Vermittelst besonderer Instrumente, der sogen. Dynamometer oder Kraftmesser, läßt sich die zur Überwindung eines Widerstandes erforderliche Kraft beobachten (z. B. Federdynamometer von Regnier).

Aufgabe 28. Wie groß ist die mechanische Arbeit, welche erforderlich ist, um ein Gewicht von 800 kg 6 m hoch zu heben?

Auflösung.

$$Ps = 800 . 6 = 4800 \text{ mkg}$$

Aufgabe 29. Wenn durch eine Dampfwinde eine Last P = 1000 kg in 8 sec. 12 m hoch gehoben wird, wie groß ist der Effekt der Winde?

Auflösung. Die Hubgeschwindigkeit ist:

$$v = \frac{12}{8} = 1{,}5 \text{ m}$$

folglich:

$$E = 1000 . 1{,}5 = 1500 \text{ mkg}$$

oder Leistung in Pferdestärken nach Gl. 18):

$$N = \frac{1500}{75} = 20$$

Aufgabe 30. Ein Dampfhammer von 500 kg Gewicht macht in der min. 50 Schläge; die Hubhöhe beträgt 75 cm. Es soll der Effekt des Hammers bestimmt werden.

Auflösung. Der Hammer macht in der sec. $\frac{50}{60} = {}^5/_6$ Schläge; also ist die Geschwindigkeit:

$$v = {}^5/_6 . 0{,}75 = 0{,}625 \text{ m}$$

und:

$$E = 500 . 0{,}625 = 312{,}5 \text{ mkg}$$

Aufgabe 31. Welche Kraft P_1 kann von einem Arbeiter bei $v_1 = 1$ m und $t_1 = 10$ Stunden Arbeitszeit ausgeübt werden, ohne ihn übermäßig zu ermüden, und wie groß ergibt sich dann die Tagesleistung?

Auflösung. Nach Gl. 20):

$$P_1 = 10\left(2 - \frac{1}{0{,}8}\right) \cdot \left(2 - \frac{10}{8}\right) = \backsim 5{,}6 \text{ kg}$$

Die Tagesleistung ergibt sich nur zu:

$$L = P_1 . v_1 . t_1 = 5{,}6 . 1 . 36\,000 = 201\,600 \text{ mkg}$$

Aufgabe 32. Rechnet man für einen Mann an der Kurbel bei anhaltender Arbeit:

$$P = 10 \text{ kg}; \qquad v = 0{,}8 \text{ m}; \qquad t = 8 \text{ Stunden},$$

welche Kraft kann derselbe dann bei gleicher Kurbelgeschwindigkeit $v = 0{,}8$ m ausüben, wenn er nur sehr kurze Zeit jeweils beschäftigt ist und sich in längeren Pausen wieder ausruhen kann?

Auflösung. Da hier t_1 = Null gesetzt werden kann, so ist nach Gl. 20):

$$P_1 = 10\left(2 - \frac{0{,}8}{0{,}8}\right) \cdot \left(2 - 0\right) = 20 \text{ kg}$$

Aufgabe 33. Wenn für ein Pferd die auf S. 24 angegebenen Werte:

$$P = 70 \text{ kg}; \qquad v = 1{,}25 \text{ m}; \qquad t = 8 \text{ Stunden}$$

angenommen werden, wieviel Stunden Arbeitszeit darf dann demselben zugemutet werden, wenn bei gleicher Geschwindigkeit eine Kraft von 84 kg ausgeübt werden soll.

Auflösung. Aus:

$$84 = 70\left(2 - \frac{1{,}25}{1{,}25}\right) \cdot \left(2 - \frac{t_1}{8}\right)$$

ergibt sich:

$$t_1 = 6{,}4 \text{ Stunden}$$

Aufgabe 34. Die einer Turbine in der sec. zuströmende Wassermenge sei $Q = 2$ cbm, das Gefälle $H = 5$ m. Wieviel theoretische Pferdekräfte hat die Turbine?

Auflösung. Da 1 cbm Wasser 1000 kg wiegt, so ist die ganze im Wasser enthaltene mechanische Arbeit für eine sec. oder der Effekt:

$$E = 1000\,QH$$

folglich:

$$N = \frac{1000\,QH}{75} = \frac{1000 . 2 . 5}{75} = \sim 133\text{*})$$

Aufgabe 35. Bei einer Dampfmaschine sei:

Kolbendurchmesser	$D =$	40 cm
Durchmesser der Kolbenstange	$d =$	6,5 cm
Kolbenhub	$h =$	0,8 m
mittlerer Dampfdruck . . .	$p =$	1,8 Atm. (1,8 kg/qcm)
Umdrehungszahl	$n =$	70 in der min.

Ges.: Anzahl der Pferdekräfte ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste (sogen. indizierte Leistung).

Auflösung. Der Kolbenquerschnitt ist:

$$\frac{D^2 \pi}{4} = \frac{40^2 . 3{,}14}{4} = 1256 \text{ qcm}$$

Kolbenstangenquerschnitt:

$$\frac{d^2 \pi}{4} = \frac{6{,}5^2 \pi}{4} = 33 \text{ qcm}$$

---

*) Die wirkliche Leistung der Turbine ist geringer. Bei einem angenommenen Güteverhältnis (vergl. § 14) = 0,7 ergibt sich:

$$N = 0{,}7 . 133 = \sim 93$$

also wirksamer Kolbenquerschnitt:

$$1256 - 33 = 1223 \text{ qcm}$$

folglich gesamter Druck auf den Kolben:

$$P = 1{,}8 \,.\, 1223 = \backsim 2200 \text{ kg}$$

Der Kolben macht bei jeder Umdrehung der Maschine einen Hin- und Hergang, also den Weg 2h; bei n Umdrehungen ist der zurückgelegte Weg = 2hn. Also der Weg in 1 sec. oder die mittlere Kolbengeschwindigkeit:

$$v = \frac{2hn}{60} = \frac{2 \,.\, 0{,}8 \,.\, 70}{60} = 1{,}87 \text{ m}$$

Daher:

$$N = \frac{Pv}{75} = \frac{2200 \,.\, 1{,}87}{75} = \backsim 55$$

Aufgabe 36. Eine Granate von 270 kg Gewicht habe an der Rohrmündung eine Geschwindigkeit von $v = \backsim 800$ m. (Vergl. Aufg. 10. S. 9.)*) Wie groß ist ihre lebendige Kraft?

Auflösung.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{G}{g}\frac{v^2}{2} = \frac{270}{9{,}81} \cdot \frac{800^2}{2} = \backsim 8\,800\,000 \text{ mkg} = 8800 \text{ mt}$$

Aufgabe 37. Vermittelst eines Riemens werden N = 20 Pferdekräfte übertragen. Der Halbmesser der Riemenscheibe beträgt R = 50 cm, die Umdrehungszahl derselben n = 150 in der Minute.

Ges.: Umfangskraft P und Umfangs- bezw. Riemengeschwindigkeit v.

Auflösung. Nach Gl. 19) S. 24:

$$P = \frac{71\,620}{50} \cdot \frac{20}{150} = 191 \text{ kg}$$

$$v = \frac{2 \,.\, 0{,}50 \,.\, 3{,}14 \,.\, 150}{60} = 7{,}85 \text{ m}$$

Aufgabe 38. Wieviel mechanische Arbeit gibt ein Schwungrad von 2 m Halbmesser und 6000 kg Gewicht ab, während es von n = 10 Umdrehungen auf $n_1 = 4$ Umdrehungen herabgeht?

Auflösung. Die Masse des Schwungrades ist:

$$m = \frac{6000}{9{,}81} = \backsim 612$$

die Umfangsgeschwindigkeit am Anfang:

$$c = \frac{2R\pi n}{60} = \frac{2 \,.\, 2 \,.\, 3{,}14 \,.\, 10}{60} = 2{,}1 \text{ m}$$

am Ende:

$$v = \frac{2R\pi n_1}{60} = \frac{2 \,.\, 2 \,.\, 3{,}14 \,.\, 4}{60} = 0{,}84 \text{ m}$$

folglich nach Gl. 23) S. 26:

$$Ps = \frac{612 \,.\, 2{,}1^2}{2} - \frac{612 \,.\, 0{,}84^2}{2} = 1134 \text{ mkg}$$

*) 28 cm-Schiffskanone (Krupp C. 97).

Abschnitt II.

Die Lehre vom Gleichgewicht der auf einen festen Körper wirkenden Kräfte (Statik fester Körper).

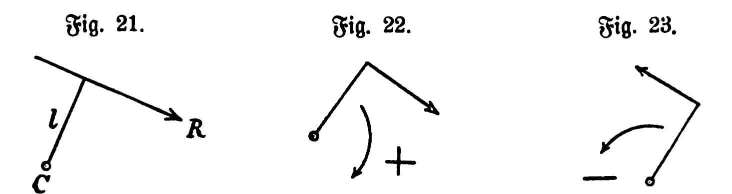
§ 6.

Das statische Moment.

Wirkt eine Kraft auf einen um eine feste Achse drehbaren Körper, so wird dieselbe, wenn ihre Richtungslinie außerhalb der Achse liegt, eine Drehung des Körpers hervorzubringen suchen. Das Bestreben, den Körper zu drehen, ist um so größer, je größer die Kraft und je größer deren Abstand von der Drehachse ist. Um die Größe dieses Drehbestrebens durch Zahlen ausdrücken zu können, hat man den Begriff des statischen Momentes eingeführt.

Man versteht unter dem statischen Moment einer Kraft R (Fig. 21) in bezug auf eine außerhalb der Kraftrichtung liegende Drehachse C, welche

Fig. 21. Fig. 22. Fig. 23.



rechtwinklig zur Kraftebene gerichtet ist, das Produkt aus der Kraft und dem winkelrechten Abstande derselben von der Drehachse. Man nennt diesen Abstand l den Hebelarm der Kraft und kann danach kurz sagen:

Moment = Kraft × Hebelarm

oder:

$$\mathfrak{M} = R l \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 24)$$

Betreffs des Vorzeichens der Momente würde es gleichgültig sein, welche Drehrichtung, ob rechts oder links herum, als die positive eingeführt wird. Wenn aber eine bestimmte Drehrichtung als positiv gilt, so muß die entgegengesetzte als negativ angesehen werden. Man ist übereingekommen, das Moment einer Kraft positiv zu nennen, wenn die Kraft eine Drehung rechts herum, also im Sinne der Zeiger einer Uhr hervorzubringen sucht (Fig. 22); das Moment einer Kraft, welche die entgegengesetzte Drehung hervorbringt, ist dann negativ (Fig. 23).

Faßt man die Kraft R, deren Angriffspunkt A sein möge (Fig. 24), als Mittelkraft auf und zerlegt dieselbe in 2 Seitenkräfte Q und P, von denen die eine Q in die Richtung AC fällt, während die zweite P rechtwinklig dazu

gerichtet ist, so kann nur die Kraft P eine Drehung erzeugen, da die Wirkung von Q durch den Widerstand der festen Achse aufgehoben wird.

Aus der Ähnlichkeit der beiden Dreiecke ABD und CAE folgt:

$$\frac{AB}{AD} = \frac{CA}{CE}$$

d. h.:

$$\frac{R}{P} = \frac{r}{l}$$

also:

$$Rl = Pr$$

oder in Worten: *Das statische Moment der Mittelkraft ist gleich dem statischen Moment derjenigen Seitenkraft, welche rechtwinklig zu der Verbindungslinie des Angriffspunktes der*

Fig. 24.

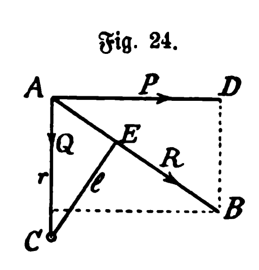
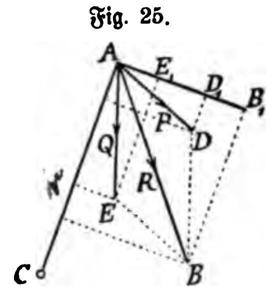


Fig. 25.



Kraft mit der Drehachse (also in Fig. 24 rechtwinklig zu AC) *gerichtet ist.*

Haben (Fig. 25) die Seitenkräfte P und Q der Kraft R eine solche Lage, daß keine derselben in die Richtung AC hineinfällt, so kann man jede der drei Kräfte R, P, Q für sich nach den Richtungen AC und rechtwinklig dazu zerlegen.

Nach Fig. 25 ist die rechtwinklig zu AC gerichtete Seitenkraft

der Kraft R: $= AB_1$
„ „ P: $= AD_1$
„ „ Q: $= AE_1$

Wird die Strecke AC wieder mit r bezeichnet, so ist nach dem vorigen Satz das statische Moment

der Kraft R: $\mathfrak{M} = AB_1 \,.\, r$
„ „ P: $\mathfrak{M}_1 = AD_1 \,.\, r$
„ „ Q: $\mathfrak{M}_2 = AE_1 \,.\, r$

Da nun nach Fig. 25:

$$AB_1 = AD_1 + D_1B_1$$

und wegen:

$$D_1B_1 = AE_1$$

auch:

$$AB_1 = AD_1 + AE_1$$

ist, so folgt:

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 \quad . . . . 25)$$

In Worten: Das statische Moment der Mittelkraft ist gleich der Summe der statischen Momente ihrer Seitenkräfte in bezug auf eine gegebene Achse.

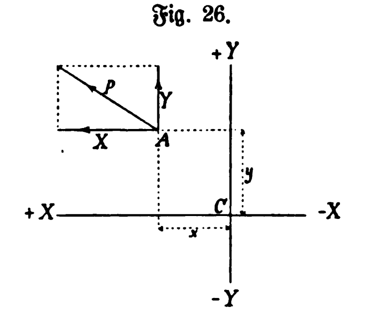
Sind mehrere in der Ebene zerstreut liegende Kräfte $P_1 P_2 \ldots P_n$ gegeben und ist R deren Gesamtmittelkraft, so vereinige man zunächst die Kräfte P_1 und P_2 zu der Mittelkraft R_{1-2}. Das Moment der letzteren in bezug auf eine rechtwinklig zur Kraftebene gerichtete Drehachse ist nach dem vorigen Satze gleich der Summe der Momente der Kräfte P_1 und P_2. Setzt man dann weiter R_{1-2} mit P_3 zu der Mittelkraft R_{1-3} zusammen, so ist das Moment von R_{1-3} gleich der Summe der Momente der Kräfte R_{1-2} und P_3, folglich auch gleich der Summe der Momente der Kräfte $P_1 P_2 P_3$. In derselben Weise weiter schließend, erhält man den Satz:

Das statische Moment der Mittelkraft ist gleich der Summe der statischen Momente aller einzelnen Kräfte in bezug auf eine gegebene Achse.

Der obige geometrisch geführte Beweis dieses Satzes ist zwar anschaulich, jedoch insofern nicht ganz streng, als das Vorzeichen immer aus der Figur entnommen werden muß. Vollständig scharf ist der Beweis nur analytisch, z. B. in folgender Weise (nach L. Henneberg) zu führen.

Man denke sich durch den Drehpunkt C ein rechtwinkliges Koordinatensystem so gelegt, daß aus der links von C positiv angenommenen X-Achse durch eine positive Drehung (im Sinne des Uhrzeigers) um 90° die positive Y-Achse entsteht (Fig. 26).

Fig. 26.



Es möge zunächst eine Kraft P in der Ebene des Koordinatensystems gegeben sein, welche an dem Punkte A angreift. Die Seitenkräfte von P in der Richtung der Koordinatenachsen seien X, Y, wobei X und Y positiv sind, wenn dieselben die Richtung der positiven Achsen haben; im anderen Falle dagegen negativ. Werden die Koordinaten des Punktes A mit x, y bezeichnet, so ist das Moment der Seitenkräfte in bezug auf den Drehpunkt C:

$$\mathfrak{M} = xY \pm yX$$

Dieser Ausdruck wird positiv oder negativ sein, je nachdem der Drehungssinn der Kraft P positiv oder negativ ist; stellt also ganz allgemein das Moment einschließlich des Vorzeichens dar.

An dem Punkte A sollen nun mehrere in der Ebene des Koordinatensystems liegende Kräfte $P_1 P_2 P_3 \ldots$ angreifen, deren Mittelkraft R sein möge.

Sämtliche Kräfte seien in Seitenkräfte nach der Richtung der Koordinatenachsen zerlegt, und zwar:

die Kraft P_1 in die Seitenkräfte X_1 Y_1
" " P_2 " " " X_2 Y_2
. . . .

Die Seitenkräfte von R sind dann:

$$R_x = \Sigma(X)$$
$$R_y = \Sigma(Y)$$

Daraus ergibt sich das Moment:

$$\mathfrak{M} = x\,\Sigma(Y) \pm y\,\Sigma(X)$$

Nun ist das Moment

der Kraft P_1: $\mathfrak{M}_1 = x Y_1 \pm y X_1$
" " P_2: $\mathfrak{M}_2 = x Y_2 \pm y X_2$
. . . .

Die Summe aus den Momenten sämtlicher Kräfte P ist daher:

$$\mathfrak{M} = \Sigma(xY \pm yX) = x\,\Sigma(Y) \pm y\,\Sigma(X)$$

also übereinstimmend mit dem Momente der Mittelkraft.

§ 7.

Gleichgewichtsbedingungen für einen festen Körper.

Ein Körper befindet sich im Gleichgewichte, wenn er durch die auf ihn wirkenden Kräfte in seiner geradlinig gleichförmigen Bewegung oder, wenn er in Ruhe war, in seiner Ruhe nicht gestört wird.

Die an einem Körper angreifenden Kräfte befinden sich im Gleichgewichte, wenn ihre Wirkungen auf den Körper sich gegenseitig aufheben.

Da jede einzelne Kraft für sich allein eine Bewegungsänderung des Körpers zur Folge haben würde, so kann ein Körper sich nur dann im Gleichgewichte befinden, wenn die Mittelkraft sämtlicher auf ihn einwirkender Kräfte = Null ist.

Zwei Kräfte heben einander auf (sind gleichwertig oder äquivalent), wenn sie in derselben Geraden wirken, gleiche Größe, aber entgegengesetzte Richtung haben. Mehrere auf einen Körper wirkende Kräfte können daher nur dann im Gleichgewichte sein, wenn jede derselben mit der Mittelkraft aller übrigen gleiche Größe, aber entgegengesetzte Richtung hat.

Wirken z. B. drei Kräfte, die sich im Gleichgewichte halten, auf einen Körper, so muß jede derselben mit der Mittelkraft der beiden anderen Kräfte gleiche Größe und entgegengesetzte Richtung haben. Die drei Kräfte schneiden sich dann in einem Punkte. Z. B. muß die Mittelkraft von P_1 und P_2

(Fig. 27), welche dargestellt wird durch die Diagonale O B des aus den Kräften P_1 und P_2 konstruierten Parallelogramms O A B C gleich und entgegengesetzt P_3 sein.

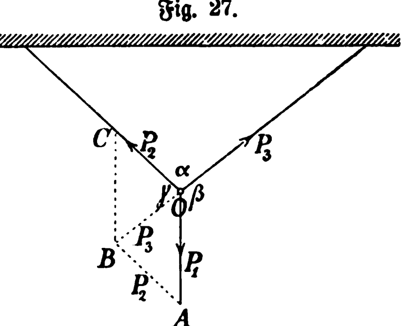


Fig. 27.

Sind α, β, γ die Winkel zwischen den drei Kraftrichtungen, so ist im Dreieck A B O:

$$\sphericalangle ABO = 180^0 - \alpha$$
$$\sphericalangle AOB = 180^0 - \beta$$
$$\sphericalangle OAB = 180^0 - \gamma$$

und da sich in einem Dreieck die Seiten wie die sinus der gegenüberliegenden Winkel verhalten, so ist:

$$P_1 : P_2 : P_3 = \sin(180^0 - \alpha) : \sin(180^0 - \beta) : \sin(180^0 - \gamma)$$

oder da:

$$\sin(180^0 - x) = \sin x$$
$$P_1 : P_2 : P_3 = \sin\alpha : \sin\beta : \sin\gamma$$

Liegen sämtliche Kräfte in derselben geraden Linie, so muß für den Fall des Gleichgewichts die Summe der nach einer Richtung hin wirkenden Kräfte gleich sein der Summe der nach der entgegengesetzten Richtung hin wirkenden Kräfte. Führt der Körper dabei eine gleichförmig fortschreitende Bewegung aus, so nennt man die der Bewegung entgegengesetzt gerichteten Kräfte den Widerstand, im Gegensatz zu den bewegenden Kräften. Der Gleichgewichtszustand für diesen Fall kann dann durch die Bedingung ausgedrückt werden:

Kraft = Widerstand

Befindet sich ein Körper unter Einwirkung mehrerer verschieden gerichteter, in derselben Ebene wirkender Kräfte im Gleichgewichte, so muß nach einer (übrigens beliebigen) Richtung hin gerade so viel Kraft wirken als nach der entgegengesetzten Richtung; es darf nach keiner Richtung hin ein Überschuß von Kraft vorhanden sein. Es muß daher, wenn man die Kräfte nach bestimmten Achsenrichtungen zerlegt, die algebraische Summe (d. h. die mit Rücksicht auf das Vorzeichen genommene Summe) der in eine Achsenrichtung hinein fallenden Seitenkräfte = Null sein.

Wenn aber die letzte Bedingung auch erfüllt ist, so läßt sich umgekehrt daraus noch nicht der Schluß ziehen, daß der Körper sich auch im Gleichgewichtszustande befindet. Um im Gleichgewichte zu sein, darf derselbe unter der Einwirkung der Kräfte auch keine Drehbewegung ausführen. Das Bestreben einiger der Kräfte, den Körper nach der einen Richtung zu drehen, muß daher aufgehoben werden durch das ebenso große Bestreben der übrigen Kräfte, dem Körper die entgegengesetzte Drehung zu erteilen; oder: die Summe der statischen Momente der nach einer Richtung hin drehenden Kräfte muß gleich sein der

Summe der statischen Momente der nach der entgegengesetzten Richtung hin drehenden Kräfte in bezug auf eine bestimmte Achse.

Für den Fall, daß sämtliche Kräfte in einer Ebene liegen, und daß dieselben in wagerechte und senkrechte Seitenkräfte zerlegt werden, daß ferner die Drehachse rechtwinklig zu der Kraftebene gerichtet ist, lauten danach die Gleichgewichtsbedingungen für einen festen Körper:

1. Die algebraische Summe der wagerechten Kräfte muß = Null sein.
2. Die algebraische Summe der senkrechten Kräfte muß = Null sein.
3. Die algebraische Summe der statischen Momente muß = Null sein.

§ 8.

Zusammensetzung mehrerer in derselben Ebene wirkender Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten.

Die Regeln, nach denen zwei Kräfte, welche sich in einem Punkte schneiden, zu einer Mittelkraft zusammenzusetzen sind, wurden bereits unter 4. § 4 (Seite 18 und 19) gegeben.

Für die Zusammensetzung zweier in derselben Ebene wirkender Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten gilt die Regel:

Man verlängere die Richtungslinien der beiden Kräfte bis zu ihrem Schnittpunkt und konstruiere dort das Kräfteparallelogramm; denn:

Fig. 28.

Man kann den Angriffspunkt einer Kraft beliebig in der Richtungslinie derselben verschieben, wenn nur der neue Angriffspunkt unveränderlich mit dem ersteren verbunden ist. (Beispiel: Strick, an welchem eine Zugkraft angreift.)

Es seien z. B. die einem festen Körper angehörenden, unveränderlich miteinander verbundenen Punkte A und B die Angriffspunkte der Kräfte P_1 und P_2, welche verlängert sich im Punkte O schneiden (Fig. 28). Verschiebt man die Angriffspunkte A und B nach O, betrachtet also O als gemeinsamen Angriffspunkt der Kräfte P_1 und P_2 und konstruiert das Parallelogramm O a d b mit den Seiten $Oa = P_1$ und $Ob = P_2$, so ist die Diagonale O d gleich der gesuchten Mittelkraft R. Der Angriffspunkt derselben kann wieder beliebig in ihrer Richtung verschoben, z. B. nach dem auf der Verbindungslinie AB liegenden Punkte D verlegt werden.

Mit Hilfe des Satzes, daß das statische Moment der Mittelkraft gleich ist der Summe der statischen Momente ihrer Seitenkräfte, läßt sich die Mittelkraft R auch dann bestimmen, wenn der Schnittpunkt O der Kräfte P_1 und P_2 außerhalb der Bildfläche liegt. In bezug auf den beliebig gewählten Drehpunkt C (Fig. 28) ist:

$$Rl = P_1 r_1 + P_2 r_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 26)$$

Die Lage von R folgt dann aus der Bedingung, daß sie den winkelrechten Abstand:

$$l = \frac{P_1 r_1 + P_2 r_2}{R}$$

von dem Drehpunkt C haben muß. Größe und Richtung von R gibt die Diagonale des aus den Kräften P_1 und P_2 an beliebiger Stelle konstruierten Parallelogramms an.

Eine besondere Erwähnung verdient noch der Fall, wo die Kräfte P_1 und P_2 einander parallel sind (Fig. 29). Das Parallelogramm aus P_1 und P_2 schrumpft hier zu einer geraden Linie zusammen. Daraus folgt, daß die Mittelkraft R dieselbe Richtung hat wie die Kräfte P_1 und P_2 und gleich deren Summe ist; also:

$$R = P_1 + P_2 \quad \ldots\ldots \quad 27)$$

Fig. 29.

Da bei Aufstellung der Gleichung der statischen Momente die Lage der Drehachse willkürlich ist, so kann hier der Durchschnittspunkt C der Mittelkraft R mit der Verbindungslinie der beiden Angriffspunkte A und B als Drehachse gewählt werden (Fig. 29).

Ersetzt man die Mittelkraft R durch die gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft R_1, so befinden sich die Kräfte im Gleichgewichte, und es lassen sich daher die allgemeinen Gleichgewichtsbedingungen darauf anwenden. Nach der Gleichgewichtsbedingung 3. S. 34 ist dann:

$$-P_1 r_1 + P_2 r_2 = 0$$

oder:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

und da:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{l_2}{l_1}$$

ist, so wird:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 28)$$

Die Mittelkraft R teilt also die Verbindungslinie AB im umgekehrten Verhältnis der Seitenkräfte. Hieraus ergibt sich die Lage des Punktes C.

Sind mehr als zwei parallele Kräfte gegeben, so kann man zur Bestimmung der Mittelkraft derselben das eben angegebene Verfahren in der Weise wiederholen, daß man aus der Mittelkraft zweier Parallelkräfte und einer dritten wieder eine Mittelkraft bildet; diese dann mit einer vierten Kraft zusammensetzt usw.

Auch für beliebig viele in derselben oder in verschiedenen Ebenen wirkende Parallelkräfte gilt dann der Satz:

Die Mittelkraft gleichgerichteter Parallelkräfte ist gleich deren Summe und hat dieselbe Richtung.

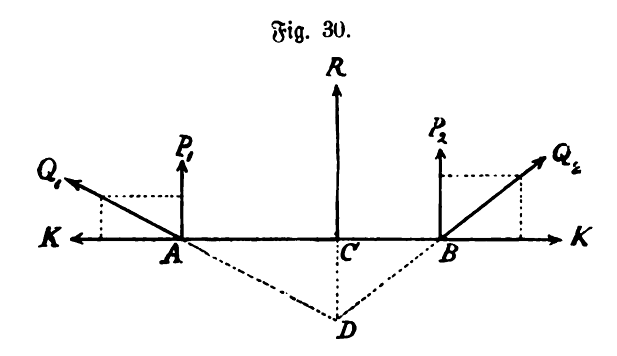
Ist R die Mittelkraft der parallelen Kräfte $P_1\, P_2\, P_3 \ldots\ldots$, deren winkelrechte Abstände von einer beliebigen, aber den Kräften ebenfalls parallelen Ebene $x_1\, x_2\, x_3 \ldots\ldots$ sein mögen, und bezeichnet man mit x_0 den winkelrechten Abstand der Mittelkraft R von derselben Ebene, so ist nach dem Satze von dem statischen Moment (S. 31):

$$R x_0 = P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + \ldots\ldots \qquad 29)$$

oder: Das statische Moment der Mittelkraft paralleler Kräfte in bezug auf eine parallele Ebene ist gleich der Summe der statischen Momente aller Einzelkräfte in bezug auf dieselbe Ebene. ✗

Man kann die Lage der Mittelkraft zweier paralleler Kräfte auch dadurch bestimmen, daß man an den Angriffspunkten A und B der Kräfte P_1 und P_2

Fig. 30.



in der Richtung A B noch zwei beliebig große, aber gleiche und entgegengesetzt gerichtete, sich also gegenseitig aufhebende Kräfte K hinzufügt (Fig. 30).

Setzt man diese Kräfte K mit P_1 und P_2 zu den Mittelkräften Q_1 bezw. Q_2 zusammen und verlängert die Richtungslinien der letzteren bis zu dem Schnittpunkt D, so ist damit ein Punkt gefunden, durch welchen die Mittelkraft R der Kräfte P_1 und P_2 hindurchgehen muß.

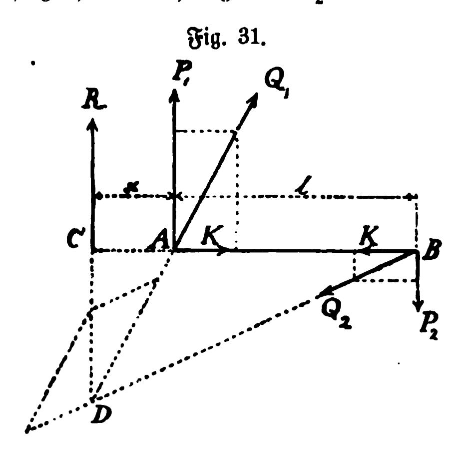
Dasselbe Verfahren kann benutzt werden zur Bestimmung der Mittelkraft R von zwei entgegengesetzt gerichteten Parallelkräften P_1 und P_2 von ungleicher Größe (Fig. 31).

Die Mittelkraft hat hier den Wert:

$$R = P_1 - P_2 \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad 30)$$

Nimmt man die Richtung von P_1 als positiv an und ist $P_1 > P_2$, so ist auch R positiv, hat also die Richtung von P_1. Ist dagegen $P_2 > P_1$, so ist R negativ, hat folglich die Richtung von P_2.

Fig. 31.



Also: Die Mittelkraft von zwei entgegengesetzt gerichteten Parallelkräften von ungleicher Größe ist gleich deren Differenz und hat die Richtung der größeren Kraft.

Die Lage von R ergibt sich aus der Momentengleichung, bezogen auf den beliebigen Drehpunkt C:

$$-P_1 x + P_2 (l + x) = 0$$

woraus folgt:

$$x = \frac{P_2}{P_1 - P_2} l \qquad 31)$$

Sind die entgegengesetzt gerichteten Parallelkräfte einander gleich ($P_1 = P_2 = P$), so hat deren Mittelkraft (als Differenz der gleich großen Kräfte P) die Größe Null und nach der letzten Gleichung wird $x = \infty$. Daraus folgt der Satz:

Zwei gleich große entgegengesetzt gerichtete Parallelkräfte lassen sich nicht durch eine Mittelkraft ersetzen, sondern bilden ein Kräftepaar von unveränderlichem Momente.

Fig. 32.

Ist nämlich (Fig. 32) $AB \perp P$ (was sich stets durch Verschiebung des Angriffspunktes einer der Kräfte P in ihrer Richtungslinie erreichen läßt) und man stellt die Gleichung der statischen Momente auf in bezug auf einen in der Richtung AB liegenden Drehpunkt C, der die beliebige Entfernung x vom Punkte A haben möge, so erhält man:

$$\mathfrak{M} = -Px + P(l + x)$$

oder:

$$\mathfrak{M} = Pl \qquad 32)$$

Das Moment des Kräftepaares ist also unabhängig von x und hat stets den unveränderlichen Wert: Kraft multipliziert mit dem winkelrechten Abstande der beiden Kräfte voneinander, oder wenn dieser Abstand wieder der **Hebelarm** des Kräftepaares genannt wird:

Moment = Kraft × Hebelarm.

Über die in einer und derselben Ebene wirkenden **Kräftepaare** sind folgende Sätze zu merken:

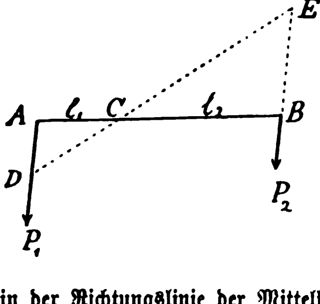
Die Wirkungen zweier Kräftepaare von gleichen Momenten und gleicher Drehrichtung stimmen überein.

Zwei Kräftepaare von gleichen Momenten und entgegengesetzten Drehrichtungen halten einander im Gleichgewicht.

Mehrere Kräftepaare lassen sich ersetzen durch ein einziges Kräftepaar, dessen Moment gleich ist der algebraischen Summe der Momente der gegebenen Kräftepaare.

Mehrere Kräftepaare sind daher im Gleichgewicht, wenn die algebraische Summe ihrer Momente gleich Null ist, d. h. wenn die Momentensumme der nach einer Richtung hin drehenden Kräftepaare gleich ist der Momentensumme der nach der entgegengesetzten Richtung hin drehenden Kräftepaare.

Fig. 33.



Aufgabe 39. Es soll die Lage der Mittelkraft von zwei gleichgerichteten Parallelkräften P_1 und P_2 durch Konstruktion bestimmt werden.

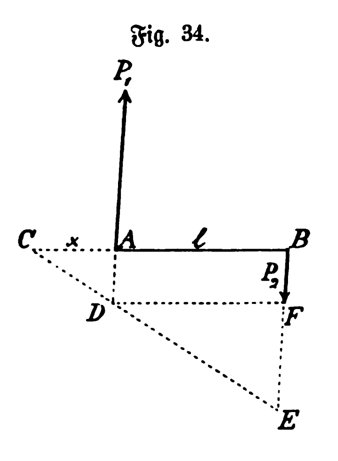
Auflösung. Man verbinde die Angriffspunkte A und B der Kräfte P_1 und P_2 durch die Gerade AB (Fig. 33), mache $AD = P_2$ und $BE = P_1$ und ziehe die Gerade DE, welche die AB im Punkte C schneidet. Nach Gl. 28) S. 35 ist dann C ein Punkt in der Richtungslinie der Mittelkraft aus P_1 und P_2; denn in den ähnlichen Dreiecken BCE und ACD verhält sich:

$$\frac{BE}{AD} = \frac{BC}{AC}$$

oder:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

Fig. 34.



Aufgabe 40. Es soll die Lage der Mittelkraft R von zwei entgegengesetzt gerichteten, ungleich großen Parallelkräften P_1 und P_2 durch Konstruktion gefunden werden.

Auflösung. (Fig. 34.) Man ziehe AB, mache $AD = P_2$ und $BE = P_1$ und ziehe die Gerade ED, deren Richtung die verlängerte AB in C schneidet. Die Lage der den Kräften P_1 und P_2 parallelen Mittelkraft R ist dadurch bestimmt, daß dieselbe durch den Punkt C hindurchgehen muß.

Der Beweis folgt, wenn man noch die Hilfslinie $DF \parallel AB$ zieht, aus Fig. 34 und Gl. 31) S. 37.

Aufgabe 41. Zwei parallele gleichgerichtete Kräfte $P_1 = 20$ kg und $P_2 = 50$ kg wirken an zwei im Abstande von 2,1 m fest miteinander verbundenen Punkten A und B. Wie groß ist die Mittelkraft R und wie groß sind die Abschnitte l_1 und l_2, in welche dieselbe die Linie AB zerlegt?

Auflösung.

$$R = P_1 + P_2 = 20 + 50 = 70 \text{ kg}$$

Nach Gl. 28) S. 35 ist:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{20}{50} = 0{,}4$$

oder:

$$l_2 = 0{,}4\, l_1$$

Gegeben ist:

$$l_1 + l_2 = 2{,}1 \text{ m}$$

also auch:

$$l_1 + 0{,}4\, l_1 = 2{,}1 \text{ m}$$

$$l_1 = \frac{2{,}1}{1{,}4} = 1{,}5 \text{ m}$$

danach:

$$l_2 = 2{,}1 - l_1 = 2{,}1 - 1{,}5 = 0{,}6 \text{ m}$$

Aufgabe 42. Eine Kraft $P = 16$ kg wirkt an einem Hebelarm $l = 1{,}2$ m. Wie groß muß die Kraft P_1 sein, welche, an einem Hebelarme $l_1 = 0{,}8$ m wirkend, dasselbe Drehmoment erzeugen würde?

Auflösung.

$$\mathfrak{M} = P_1\, l_1 = P\, l$$

folglich:

$$P_1 = \frac{P\, l}{l_1} = \frac{16 \,.\, 1{,}2}{0{,}8} = 24 \text{ kg}$$

Aufgabe 43. Eine wagerechte Stange AB, in C durch ein Gewicht $Q = 60$ kg belastet, ist an ihren Endpunkten unterstützt. Wie groß sind die in A und B wirkenden Drücke P_1 und P_2, wenn $AC = 1$ m, $CB = 1{,}5$ m ist, und wenn die Stange selbst als gewichtslos betrachtet wird?

Fig. 35.

Auflösung. (Fig. 35.) Stellt man die Momentengleichung in bezug auf den Drehpunkt B auf, so liefert die Kraft P_2 keinen Beitrag, da deren Hebelarm = Null ist. Man erhält:

$$P_1 \,.\, 2{,}5 - 60 \,.\, 1{,}5 = 0$$

daraus:

$$P_1 = \frac{60 \,.\, 1{,}5}{2{,}5} = 36 \text{ kg}$$

Die Momentengleichung in bezug auf den Drehpunkt A lautet:

$$60 \,.\, 1 - P_2 \,.\, 2{,}5 = 0$$

folglich:

$$P_2 = \frac{60 \,.\, 1}{2{,}5} = 24 \text{ kg}$$

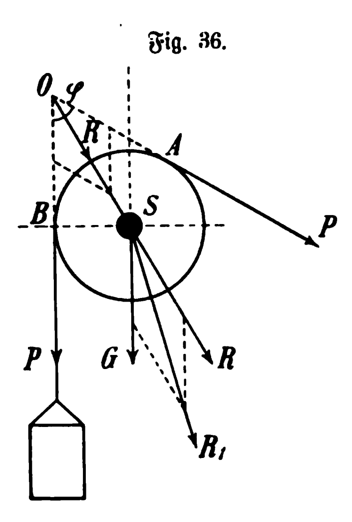


Fig. 36.

Aufgabe 44. Die Richtung des Seilzuges bei einer Förderseilscheibe sei mit $\varphi = 60°$ gegeben (Fig. 36). Die zu hebende Last (einschließlich Förderschale und Seilgewicht) betrage P = 4000 kg. Wie groß ist die Mittelkraft R, welche die Seilscheibenachse auf Biegung beansprucht.*)

Auflösung. Die beiden Kräfte P, welche an den Punkten A und B angreifen, sind nach der auf S. 34 angegebenen Regel im Punkte O zusammenzusetzen.

Es ist dann:

$$R^2 = P^2 + P^2 - 2P^2 \cos(180 - \varphi)$$

oder:

$$R = P \,.\, \sqrt{2\,(1 + \cos\varphi)}$$

$$= 4000 \,.\, \sqrt{2\,(1 + 0{,}5)} = 6928 \text{ kg}$$

Bei Berücksichtigung des Eigengewichtes G von Scheibe und Achse ist R noch mit G im Schwerpunkte S zur Mittelkraft R_1 zusammenzusetzen.

§ 9.

Schwerpunkt.

Jeder Körper kann betrachtet werden als zusammengesetzt aus einzelnen materiellen Punkten oder Massenteilchen, deren Summe die ganze Masse des Körpers ausmacht. Die Gewichte der einzelnen Massenteilchen sind Kräfte, welche nach dem Erdmittelpunkt gerichtet sind, die man aber wegen der geringen Ausdehnung der in Betracht zu ziehenden Körper im Vergleich zu dem Erdhalbmesser (im Mittel = 6 370 000 m) als lotrecht abwärts gerichtete Parallelkräfte ansehen darf. Die Mittelkraft der Gewichte der sämtlichen Massenteilchen ist daher, als Mittelkraft gleich gerichteter Parallelkräfte (der Schwerkräfte), gleich deren Summe, d. h. gleich dem Gewichte des ganzen Körpers. Diese Mittelkraft geht, in welche Lage man den Körper auch bringen möge, immer durch ein und denselben Punkt, den Schwerpunkt.

Der Schwerpunkt ist also derjenige Punkt, in welchem man sich die ganze Masse des Körpers vereinigt denken kann, und bei dessen Unterstützung der Körper sich in jeder Lage im Gleichgewichte befindet.

Wird der Körper in irgend einem andern Punkte unterstützt, so findet nur dann Gleichgewicht statt, wenn der Unterstützungspunkt in der Lotrechten des Schwerpunktes liegt. Aus dieser Lage herausgebracht und darauf losgelassen, dreht sich der Körper um den Unterstützungspunkt, bis der Schwerpunkt unterhalb desselben wieder in die durch den Unterstützungspunkt gelegte Lotrechte gelangt.

Hierauf beruht vermittelst des Versuchsverfahrens die Bestimmung des Schwerpunktes unregelmäßig begrenzter oder auch solcher Körper, deren Dichtig-

*) Berechnung von Achsen auf Biegung siehe: Laudenstein, Festigkeitslehre. 9. Aufl. S. 113. Aufg. 49.

keit nicht überall die gleiche ist. Man hänge den betr. Körper, z. B. eine dünne Platte ABCD an einem Punkte A vermittelst eines Fadens auf (Fig. 37). Der Schwerpunkt S wird dann, wenn der Körper zur Ruhe gekommen ist, auf der durch A gezogenen Lotrechten AM, also in der Verlängerung des Fadens liegen.

Hängt man dann den Körper an einem anderen Punkte B auf (Fig. 38), so enthält die durch B gezogene Lotrechte BN ebenfalls den Schwerpunkt, so daß dieser selbst im Schnittpunkte S der Geraden AM und BN liegt.

Fig. 37.

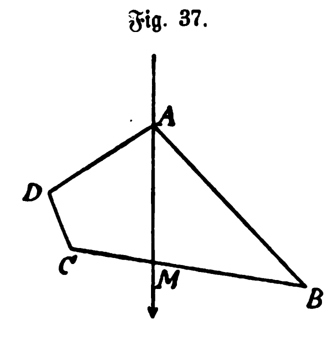
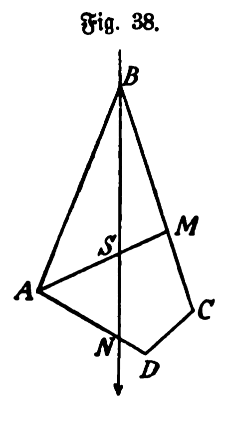


Fig. 38.



Eine Linie, welche den Schwerpunkt enthält, wie z. B. hier jede der Geraden AM und BN, wird Schwerlinie genannt.

Zur Bestimmung des Schwerpunktes eines Körpers durch Rechnung kann die Gl. 29) S. 36 benutzt werden, wenn man darin statt R das Gewicht des ganzen Körpers, statt P_1 P_2 ... die Gewichte der einzelnen Massenteilchen einsetzt. Bezeichnet man mit m_1 m_2 ... die Massenteilchen des Körpers, mit M deren Summe, mit x_1 x_2 ... ihre rechtwinkligen Entfernungen von einer beliebigen Ebene und mit x_0 die rechtwinklige Entfernung des Schwerpunktes des Körpers von derselben Ebene, so ist zu setzen nach Gl. 15) S. 16:

$$R = M g$$
$$P_1 = m_1 g$$
$$P_2 = m_2 g$$
$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

wodurch Gl. 29) übergeht in:

$$M g x_0 = m_1 g x_1 + m_2 g x_2 + m_3 g x_3 + \ldots$$

oder:

$$M x_0 = m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \ldots \ldots \ldots \quad 33)$$

Allgemein kann das Produkt mx, d. i. Massenteilchen multipliziert mit seinem winkelrechten Abstande von einer Ebene, das *statische Moment* des Massenteilchens in bezug auf diese Ebene genannt werden. Bezeichnet man die Summe aller dieser Produkte durch Σ (mx), so folgt aus Gl. 33):

$$x_0 = \frac{\Sigma (m x)}{M} \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 34)$$

d. h.: *Der Abstand des Schwerpunktes eines Körpers von irgend einer Ebene ist gleich der Summe der statischen Momente der einzelnen Massenteilchen, dividiert durch die Masse des ganzen Körpers.*

Bei einem *homogenen* (gleichförmig dichten) Körper verhalten sich die Raumteile wie die Massenteile. Ist daher V der Rauminhalt des ganzen

Körpers, $v_1 v_2 \ldots$ die Rauminhalte seiner einzelnen Teile, so ist auch für einen homogenen Körper nach Gl. 33):

$$V x_0 = v_1 x_1 + v_2 x_2 + v_3 x_3 + \ldots$$

Hat der homogene Körper die Gestalt einer ebenen Platte von überall gleicher Dicke, bei welcher sich die Raumteile wie die Flächenteile verhalten, und ist F die ganze Fläche, $f_1 f_2 f_3 \ldots$ die Flächen der einzelnen Teile, so erhält man aus der letzten Gleichung:

$$F x_0 = f_1 x_1 + f_2 x_2 + f_3 x_3 + \ldots \ldots \ldots \quad 35)$$

Obgleich das statische Moment erklärt wurde als das Produkt Kraft mal Hebelarm, so kann man doch auch von dem statischen Momente einer Fläche reden, indem man die Fläche als gleichförmig mit Masse erfüllt ansieht und als Gewicht auffaßt, welches im Schwerpunkte der Fläche angreift. Gl. 35) sagt danach aus:

Das statische Moment der ganzen Fläche ist gleich der algebraischen Summe der statischen Momente der einzelnen Flächenteile in bezug auf eine gegebene Achse.

Gl. 35) kann benutzt werden zur Bestimmung der Lage des Schwerpunktes einer ebenen Figur, die zusammengesetzt gedacht werden kann aus einzelnen Teilen mit bekanntem Schwerpunkt.

Ist die Achse eine Schwerachse, d. h. geht sie durch den Schwerpunkt der Figur, so ist $x_0 =$ Null; folglich nach Gl. 35):

$$f_1 x_1 + f_2 x_2 + f_3 x_3 + \ldots = 0 \quad \ldots \ldots \quad 36)$$

In Worten: Die algebraische Summe der statischen Momente der einzelnen Flächenteile in bezug auf die Schwerachse ist gleich Null.

Ist daher eine Symmetrieachse oder Symmetrieebene vorhanden, so liegt in dieser immer der Schwerpunkt.

Hat der Körper, dessen Schwerpunkt zu bestimmen ist, die Gestalt einer Linie, so versteht man darunter eine Aneinanderreihung von Massenpunkten oder eine Linie mit darüber gleichmäßig verteilter Masse, wie dieses z. B. bei einem dünnen Drahte annähernd der Fall ist.

§ 10.

Schwerpunktsbestimmungen von Linien, Flächen, Körpern.

1. Schwerpunkte von Linien.

Gerade Linie.

Der Schwerpunkt einer (materiellen) geraden Linie liegt im Halbierungspunkte derselben.

Gebrochene Linie (Fig. 39).

Die einzelnen Teile der gebrochenen Linie seien a b c, deren Schwerpunktsabstände von der Achse A Y: $x_1 x_2 x_3$, von der Achse A X: $y_1 y_2 y_3$. Werden

Fig. 39.

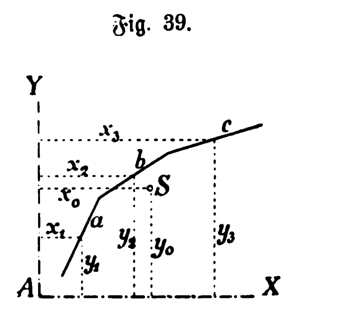
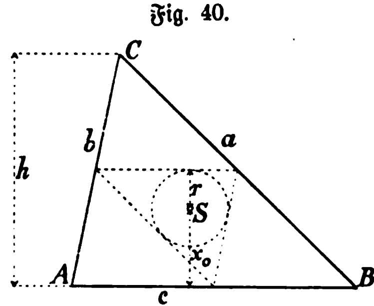


Fig. 40.



die Abstände des gesuchten Schwerpunktes S von den Achsen mit $x_0\,y_0$ bezeichnet, so erhält man mit Benutzung der Gl. 35):

$$(a + b + c)\,x_0 = a\,x_1 + b\,x_2 + c\,x_3$$
$$(a + b + c)\,y_0 = a\,y_1 + b\,y_2 + c\,y_3$$

und daraus:

$$x_0 = \frac{a\,x_1 + b\,x_2 + c\,x_3}{a + b + c}$$

$$y_0 = \frac{a\,y_1 + b\,y_2 + c\,y_3}{a + b + c}.$$

Dreiecksumfang (Fig. 40).

Die Seiten des Dreiecks ABC seien abc, die Höhe desselben = h. Es ist dann in bezug auf die Achse AB, wenn man den Abstand des gesuchten Schwerpunktes S von dieser Achse mit x_0 bezeichnet:

$$(a + b + c)\,x_0 = a \cdot \frac{h}{2} + b \cdot \frac{h}{2}$$

folglich:

$$x_0 = \frac{a + b}{a + b + c} \cdot \frac{h}{2}$$

Der Abstand r des Schwerpunktes S von der Verbindungslinie der Schwerpunkte der Dreiecksseiten a und b ist dann:

$$r = \frac{h}{2} - x_0 = \frac{h}{2}\left(1 - \frac{a + b}{a + b + c}\right)$$

oder:

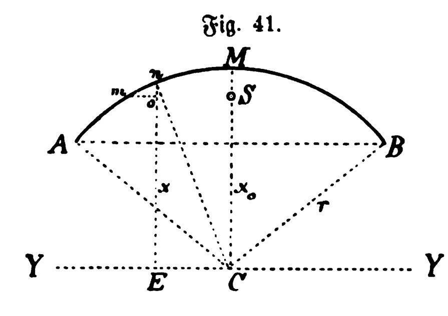
$$r = \frac{h\,c}{2} \cdot \frac{1}{a + b + c}$$

Der Abstand r ist also gleich dem Inhalt des Dreiecks ABC, dividiert durch den Umfang desselben.

In bezug auf die Achsen AC und BC erhält man für r genau denselben Wert, woraus folgt, daß der Schwerpunkt eines Dreiecksumfanges der Mittelpunkt desjenigen Kreises ist, welcher die Verbindungslinien der Schwerpunkte der einzelnen Dreiecksseiten berührt.

Man verbinde danach die Mittelpunkte der Dreiecksseiten **a b c** durch gerade Linien und halbiere die Winkel des dadurch entstehenden inneren Dreiecks. Der Schnittpunkt dieser die Winkel halbierenden Linien ist dann (nach einem bekannten geometrischen Satze) der Mittelpunkt des in das innere Dreieck eingeschriebenen Kreises und somit zugleich der gesuchte Schwerpunkt S für den Umfang des Dreiecks ABC.

Fig. 41.



Kreisbogen (Fig. 41).

Der Schwerpunkt S eines Kreisbogens AB liegt auf dem den Bogen halbierenden Halbmesser CM = r und in einer Entfernung x_0 vom Kreismittelpunkte C, die sich folgendermaßen ergibt:

Denkt man sich den Bogen AB in sehr viele kleine Teile zerlegt und stellt die statischen Momente derselben in bezug auf die durch den Punkt C parallel zu der Sehne AB gezogene Gerade YY auf, so muß nach Gl. 35) die Summe aller dieser statischen Momente gleich sein dem statischen Momente des ganzen Bogens.

Es sei mn (Fig. 41) ein solches sehr kleines Bogenstück und En = x dessen Abstand von der YY, so ist sein statisches Moment = mn . x und die Summe der statischen Momente sämtlicher Bogenstücke = Σ(mn . x). Zieht man mo ∥ AB und die Linie Cn, so verhält sich in den ähnlichen Dreiecken mno und CnE:

$$\frac{mn}{mo} = \frac{Cn}{En} = \frac{r}{x}$$

folglich:

$$mn \cdot x = mo \cdot r$$

Dieselbe Beziehung gilt für jedes andere kleine Bogenstück; daher:

$$\Sigma(mn \cdot x) = \Sigma(mo \cdot r) = r\,\Sigma(mo)$$

oder da:

$$\Sigma(mo) = \overline{AB}$$

ist, so wird:

$$\Sigma(mn \cdot x) = r \cdot \overline{AB}$$

Da nun das statische Moment des ganzen Bogens = $\overset{\frown}{AB} \cdot x_0$ ist, so erhält man:

$$\overset{\frown}{AB} \cdot x_0 = r \cdot \overline{AB}$$

woraus folgt, wenn noch die Länge des Bogens $\overset{\frown}{AB}$ mit b, die Länge der Sehne $\overline{AB}$ mit s bezeichnet wird:

$$x_0 = \frac{rs}{b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 37)$$

Für den Halbkreis ist s = 2 r und b = rπ; folglich:

$$x_0 = \frac{2r}{\pi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 38)$$

2. Schwerpunkte von Flächen.

Dreieck.

Der Schwerpunkt eines Dreiecks ABC (Fig. 42) liegt auf der Geraden CD, welche von der Spitze C nach der Mitte D der gegenüberliegenden Seite AB gezogen ist.

Denkt man sich nämlich das Dreieck ABC durch parallel zu AB gezogene Linien in sehr schmale Streifen zerlegt, so liegen deren Schwerpunkte sämtlich auf der Mittellinie CD.

Aus demselben Grunde enthält auch die von der Spitze A nach der Mitte E der gegenüberliegenden Seite BC gezogene Gerade AE den Schwerpunkt; folglich

Fig. 42.

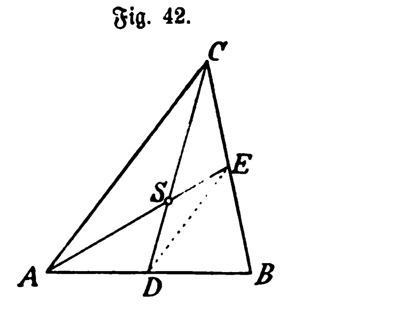
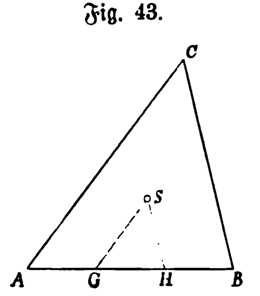


Fig. 43.



muß derselbe mit dem Schnittpunkte S der beiden Linien CD und AE zusammenfallen.

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke DES und ACS folgt:

$$DS : SC = DE : AC$$

Da nun:

$$DE = {}^1/_2 AC$$

ist, so folgt:

$$DS = {}^1/_2 SC = {}^1/_3 DC$$

Der Schwerpunkt eines Dreiecks liegt danach auf der Mittellinie und in $^1/_3$ der Höhe.

Nach dem obigen Beweise wird der Schwerpunkt eines Dreiecks auch bestimmt durch den Schnittpunkt der im ersten Drittelspunkt der Linie CD zu den Dreiecksseiten gezogenen Parallelen. Da durch die letzteren die Dreiecksseiten selbst in drei gleiche Teile geteilt werden, so folgt daraus der Satz:

Die durch die Drittelspunkte einer Dreiecksseite zu den beiden anderen Seiten gezogenen Parallelen schneiden sich im Schwerpunkte S (Fig. 43).

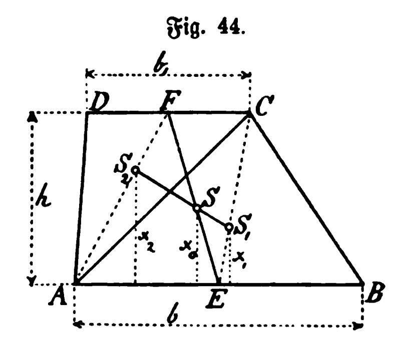
Parallelogramm.

Die Diagonalen bilden Schwerlinien, da durch dieselben das Parallelogramm in je zwei inhaltsgleiche Dreiecke zerlegt wird. Der Schwerpunkt fällt mit dem Schnittpunkt der Diagonalen zusammen.

Paralleltrapez.

Der Schwerpunkt eines Trapezes ABCD (Fig. 44) liegt auf der Geraden EF, welche die Mitten der parallelen Seiten AB und CD miteinander verbindet. Eine andere Schwerlinie erhält man, wenn man die Schwerpunkte S_1 und S_2 der beiden Dreiecke ABC und ACD, in welche sich das Trapez durch die Diagonale AC zerlegen läßt, miteinander verbindet. Der Schwerpunkt S ist der Schnittpunkt der $S_1 S_2$ mit der EF.

Fig. 44.



Bezeichnet man den Flächeninhalt des Dreiecks ABC mit F_1, des Dreiecks ACD mit F_2, und sind x_0 x_1 x_2 die senkrechten Abstände der Schwerpunkte $S S_1 S_2$ von der Achse AB, so ist nach Gl. 35) S. 42:

$$x_0 (F_1 + F_2) = F_1 x_1 + F_2 x_2$$

Setzt man hierin die Werte ein:

$$F_1 = \frac{b\,h}{2} \qquad F_2 = \frac{b_1\,h}{2}$$

$$x_1 = {}^1/_3\,h \qquad x_2 = {}^2/_3\,h$$

so folgt:

$$x_0 = \frac{h}{3} \cdot \frac{b + 2 b_1}{b + b_1}$$

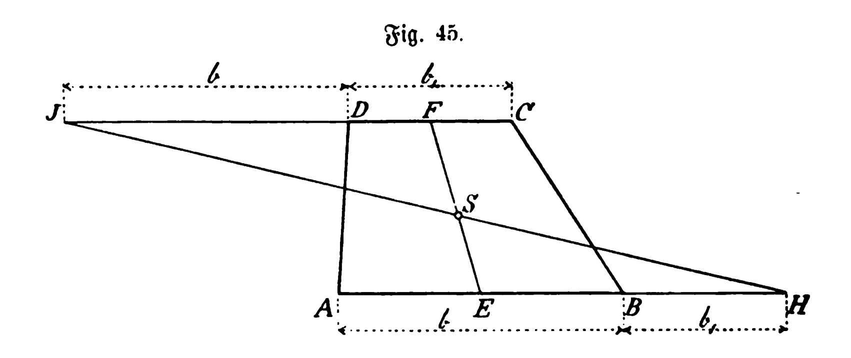
oder:

$$\frac{x_0}{h} = \frac{ES}{EF} = \frac{b + 2 b_1}{3 (b + b_1)} \quad \text{. . . . . 39)}$$

Hieraus ergibt sich eine zweite (einfachere) Konstruktion des Schwerpunktes S.

Man verlängere (Fig. 45) jede der parallelen Seiten AB und CD nach entgegengesetzten Richtungen um eine Strecke gleich der anderen Seite; mache

Fig. 45.



also $BH = b_1$ und $DJ = b$. Der Schnittpunkt S der Verbindungslinie HJ mit der Mittellinie EF ist der Schwerpunkt des Trapezes; denn:

$$\frac{ES}{FS} = \frac{EH}{FJ} = \frac{\frac{b}{2} + b_1}{\frac{b_1}{2} + b}$$

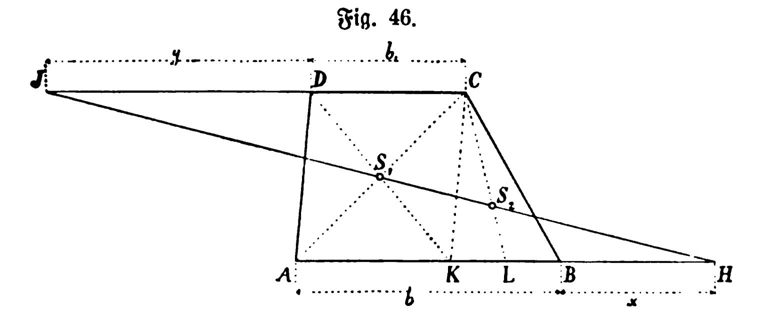
woraus übereinstimmend mit Gl. 39) folgt:

$$\frac{ES}{EF} = \frac{ES}{ES + FS} = \frac{\frac{b}{2} + b_1}{\frac{b}{2} + b_1 + \frac{b_1}{2} + b} = \frac{b + 2b_1}{3(b + b_1)}$$

Die Konstruktion Fig. 45 läßt sich noch auf andere Art folgendermaßen beweisen:

Man zerlege das Trapez ABCD (Fig. 46) durch die Gerade $CK \parallel AD$ in das Parallelogramm AKCD und das Dreieck KCB. Bestimmt man sodann

Fig. 46.



die Schwerpunkte S_1 und S_2 dieser Figuren in bekannter Weise, so wird der Schwerpunkt S des Trapezes auf der Verbindungslinie $S_1 S_2$ liegen. Man verlängere die Gerade $S_1 S_2$ nach beiden Richtungen hin bis zu den Schnittpunkten H und J mit den verlängerten Trapezseiten AB und CD.

Die vorläufig noch unbekannten Abschnitte auf letzteren seien:

$$BH = x$$
$$DJ = y$$

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke LHS_2 und CJS_2, deren Seiten LS_2 und CS_2 sich verhalten wie 1 : 2 (weil $LS_2 = \frac{1}{3} LC$), folgt:

$$CJ = 2 HL$$

oder:

$$b_1 + y = 2\left(\frac{b - b_1}{2} + x\right)$$

Nun ist aber wegen Kongruenz der Dreiecke AHS_1 und CJS_1:

$$b + x = b_1 + y$$

folglich wird:

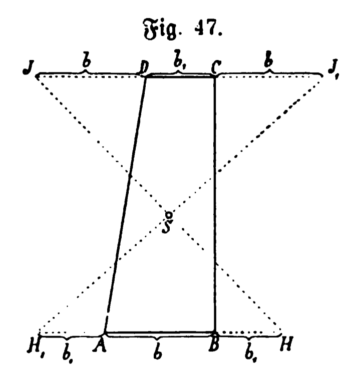
$$b + x = 2\left(\frac{b - b_1}{2} + x\right)$$

Daraus ergibt sich:

$$x = b_1 \text{ und } y = b \text{ (wie in Fig. 45).}$$

Bei verhältnismäßig hohen und schmalen Trapezen fällt der Schnitt der Mittellinie EF mit der Geraden HJ (Fig. 45) ziemlich schlank aus, was für die genaue Festlegung des Schwerpunktes nicht vorteilhaft ist. Günstiger ist in der Beziehung dann die Konstruktion Fig. 47, bei welcher sich die Geraden HJ und $H_1 J_1$ unter stumpferem Winkel schneiden. Die Mittellinie braucht hier natürlich nicht gezogen zu werden.

Fig. 47.



Andere einfache von R. Land*) angegebene Lösungen für die Schwerpunktsbestimmung eines Trapezes, die noch den Vorteil haben, daß sie nicht so viel seitlichen Raum beanspruchen als die Konstruktionen Fig. 45 und 47, sind folgende:

1. Man ziehe (Fig. 48) die Diagonale AC und durch D die DG || AC; verlängere die Mittellinie EF bis G und mache $ES = \frac{1}{3} EG$. Es ist dann S der gesuchte Schwerpunkt.

Fig. 48.

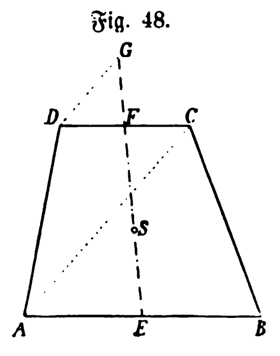
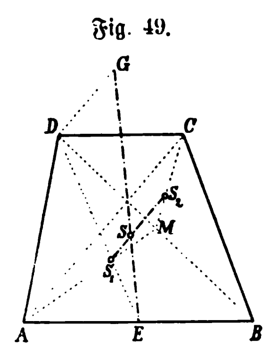


Fig. 49.



Beweis. Sind S_1 und S_2 (Fig. 49) die Schwerpunkte der Dreiecke ABD und BCD, so ist wegen $MS_1 = \frac{1}{3} MA$ und $MS_2 = \frac{1}{3} MC$:

$$S_1 S_2 \parallel AC$$

also auch:

$$S_1 S \parallel AC \parallel DG$$

Da nun:

$$ES_1 = \frac{1}{3} ED$$

so folgt:

$$ES = \frac{1}{3} EG$$

---

*) Zentralbl. d. Bauverw. 1894, S. 192 und 458.

2. Da, wie unter 1. gezeigt wurde, $S_1 S_2 \parallel AC$ ist, so schneidet die nach beiden Seiten hin verlängerte $S_1 S_2$ auf den parallelen Trapezseiten (Fig. 50) von A bezw. C aus die gleichen Strecken ab:

$$x = AH = CJ$$

und da:

$$S_1 D = 2 . S_1 E$$

so folgt:

$$DJ = 2EH$$

oder:

$$b_1 + x = 2\left(\frac{b}{2} - x\right) = b - 2x$$

also:

$$x = {}^1/_3 \, (b - b_1)$$

Fig. 50.

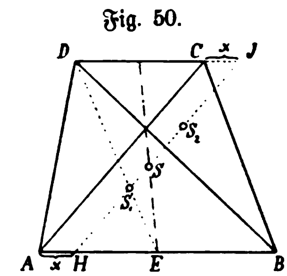
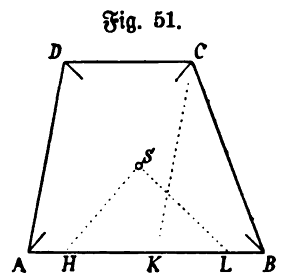


Fig. 51.



Die im Abstande x von der Ecke A zu der Diagonale AC gezogene Parallele geht hiernach durch den Schwerpunkt. Da sich dasselbe für die andere Diagonale BD ebenfalls nachweisen läßt, so erhält man den Satz:

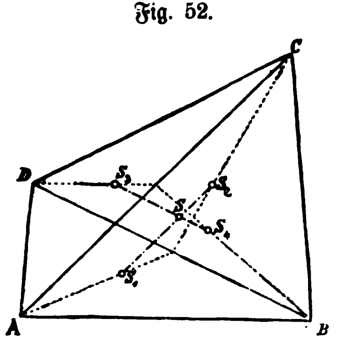
Die im Abstande $x = \frac{1}{3}(b - b_1)$ von den Ecken der größeren Grundlinie zu den Diagonalen gezogenen Parallelen schneiden sich im Schwerpunkt S.

Zur Konstruktion Fig. 51 ziehe man $CK \parallel AD$, mache $AH = BL = \frac{1}{3} BK$ und ziehe durch H und L Parallelen zu den Diagonalen AC bezw. BD. Der Schnittpunkt derselben ist der Schwerpunkt des Trapezes. (Die Diagonalen brauchen dabei nicht selbst gezogen zu werden; es genügt, deren Richtung durch Anlegen des Winkels festzulegen.)

Unregelmäßiges Viereck.

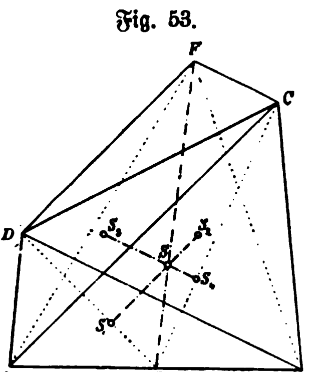
Man zerlege das Viereck ABCD (Fig. 52) durch die Diagonale BD in die beiden Dreiecke ABD und BCD und bestimme deren Schwerpunkte S_1 und S_2. Die Verbindungslinie $S_1 S_2$ ist dann eine Schwerlinie des Vierecks. Eine zweite Schwerlinie erhält man, wenn man ein anderesmal das Viereck durch die Diagonale AC

Fig. 52.



in die Dreiecke ACD und ABC zerlegt und deren Schwerpunkte S_3 und S_4 miteinander verbindet. Der Schnittpunkt der beiden Schwerlinien $S_1 S_2$ und $S_3 S_4$ gibt dann den Gesamtschwerpunkt des Vierecks.

Fig. 53.



Zieht man (Fig. 53):

$$DF \parallel AC \text{ und } CF \parallel BD$$

und verbindet den Schnittpunkt F mit der Mitte E der Seite AB, so wird wegen:

$$ES_1 = \tfrac{1}{3} ED \text{ und } ES_4 = \tfrac{1}{3} EC$$

und weil:

$$S_1 S_2 \parallel DF \text{ und } S_3 S_4 \parallel CF$$

die Gerade EF durch den Punkt S gehen und auch:

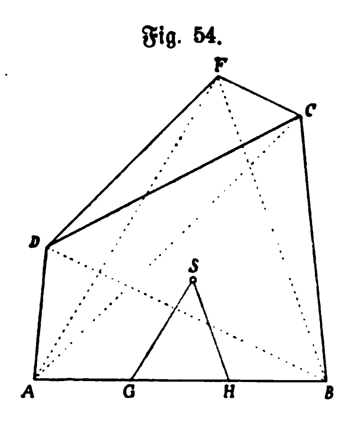
$$ES = \tfrac{1}{3} EF$$

sein müssen.

Der Punkt S ist daher gleichzeitig der Schwerpunkt des Dreiecks ABF.

Darauf beruht das folgende von R. Land angegebene*) Verfahren zur Bestimmung des Schwerpunktes S. Man teile (Fig. 54) die Seite AB in drei gleiche Teile, ziehe $CF \parallel BD$ und $DF \parallel AC$; ferner $GS \parallel AF$ und $HS \parallel BF$.

Fig. 54.



Die in Fig. 54 punktiert angedeuteten Linien brauchen selbstverständlich nicht wirklich gezogen, sondern deren Richtungen durch Anlegen des Winkels nur festgelegt zu werden.

Ein anderes vielfach benutztes Verfahren zur Schwerpunktsbestimmung ist folgendes:

Man zerlege das Viereck ABCD (Fig. 55) durch die Diagonale AC in die Dreiecke ACD nnd ABC und bestimme deren Schwerpunkte S_1 und S_2. Der Schnittpunkt der Verbindungslinie $S_1 S_2$ mit der Diagonalen AC sei E. Macht man dann $S_2 S = S_1 E$, so ist S der Schwerpunkt des Vierecks.

Der Beweis ergibt sich daraus, daß sich die Abschnitte $S_1 S$ und $S_2 S$ umgekehrt verhalten müssen wie die zugehörigen Dreiecksflächen.

Es verhält sich:

$$S_1 S : S_2 S = S_2 E : S_1 E$$

und wenn man die Hilfslinie BD (welche wegen $MS_1 = \tfrac{1}{3} MD$, und $MS_2 = \tfrac{1}{3} MB$ parallel zu $S_1 S_2$ ist) zieht und die MS bis F verlängert:

*) Zeitschrift des Hannoverschen Arch.- und Ing.-Vereins 1895, S. 451.

$$S_2E : S_1E = BH : DH$$

Da nun:

$$BH : DH = \triangle ABC : \triangle ACD$$

so ist auch:

$$S_1S : S_2S = \triangle ABC : \triangle ACD$$

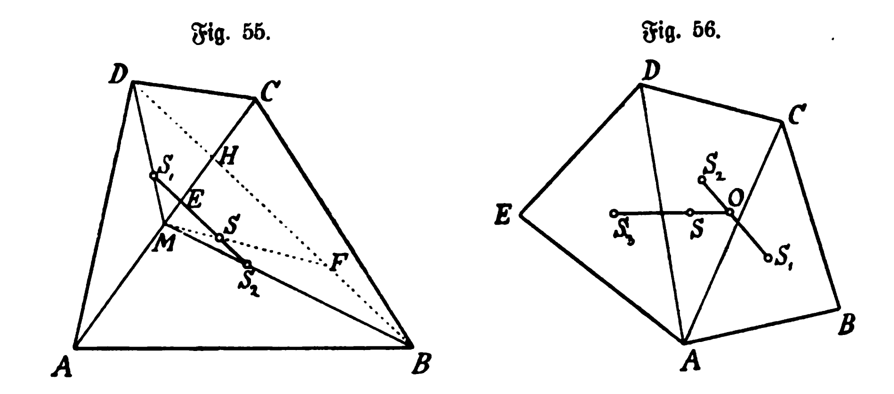


Fig. 55. Fig. 56.

Vieleck.

Um den Schwerpunkt eines beliebigen unregelmäßigen Vielecks zu finden, zerlege man dieses in einzelne Dreiecke, in deren Schwerpunkten man die Flächeninhalte derselben als Gewichte wirkend denkt. Der Angriffspunkt der Mittelkraft dieser Gewichte ist der gesuchte Schwerpunkt.

Sind z. B. $S_1 S_2 S_3$ die Schwerpunkte der Dreiecke ABC, ACD, ADE, in welche das Fünfeck ABCDE (Fig. 56) zerlegt ist, so ziehe man $S_1 S_2$ und teile diese Linie in O so, daß sich verhält:

$$S_1O : S_2O = \triangle ACD : \triangle ABC$$

Man ziehe ferner OS_3 und teile diese Linie in S so, daß sich verhält:

$$OS : S_3S = \triangle ADE : (\triangle ABC + \triangle ACD)$$

Es ist dann S der gesuchte Schwerpunkt des Fünfecks.

Der Schwerpunkt eines regelmäßigen Vielecks fällt mit dem Mittelpunkt des eingeschriebenen oder umschriebenen Kreises zusammen.

Kreisausschnitt oder Sektor.

Der Schwerpunkt liegt in der Halbierungslinie des Winkels ACB (Fig. 57). Denkt man sich den Kreisausschnitt vom Halbmesser r durch radiale Linien in sehr viele kleine Teile geteilt, so kann man diese Teile als Dreiecke betrachten, deren Schwerpunkte um $^2/_3$ r vom Kreismittelpunkte C entfernt sind. Der Schwerpunkt S des Kreisausschnittes fällt daher zusammen mit dem Schwerpunkte des mit dem Halbmesser $^2/_3$ r beschriebenen Kreisbogens $A_1 B_1$.

Da nun:

$$\widehat{A_1 B_1} = \tfrac{2}{3}\widehat{AB} = \tfrac{2}{3} b$$

und:

$$\overline{A_1 B_1} = \tfrac{2}{3}\overline{AB} = \tfrac{2}{3} s$$

so wird nach Gl. 37) S. 44:

$$x_0 = \frac{{}^2/_3 r \,.\, {}^2/_3 s}{{}^2/_3 b} = \frac{2}{3}\frac{rs}{b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 40)$$

Für den Halbkreis ist $s = 2r$ und $b = r\pi$; folglich:

$$x_0 = \frac{4r}{3\pi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 41)$$

Fig. 57.

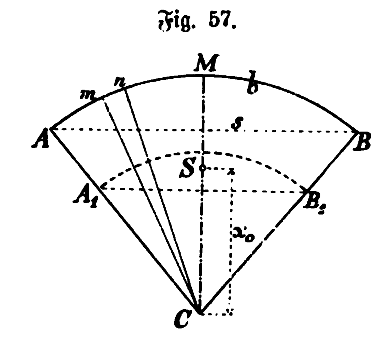
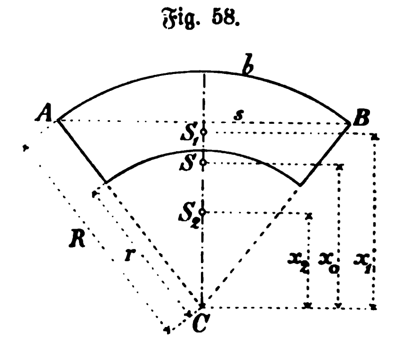


Fig. 58.



Ringausschnitt. (Fig. 58.)

Bedeutet:

F die Querschnittsfläche des vollen Kreisausschnittes vom Halbmesser R
F_2 „ „ „ „ „ „ „ r
F_1 „ „ „ Ringausschnittes;

sind ferner $x_0\, x_2\, x_1$ die entsprechenden Abstände der Schwerpunkte $S\, S_2\, S_1$ vom Kreismittelpunkte C, so ist nach Gl. 35) S. 42:

$$F x_0 = F_1 x_1 + F_2 x_2$$

also:

$$x_1 = \frac{F x_0 - F_2 x_2}{F_1}$$

Nun ist:

$$F = \frac{bR}{2};\; F_2 = \frac{b r^2}{2R};\; F_1 = \frac{b}{2}\cdot\frac{R^2 - r^2}{R}$$

und nach Gl. 40):

$$x_0 = \frac{2}{3}\frac{Rs}{b};\; x_2 = \frac{2}{3}\frac{rs}{b}$$

Nach Einsetzung dieser Werte ergibt sich der gesuchte Schwerpunktsabstand:

$$x_1 = \frac{\frac{bR}{2} \cdot \frac{2}{3} \frac{Rs}{b} - \frac{br^2}{2R} \cdot \frac{2}{3} \frac{rs}{b}}{\frac{b}{2} \cdot \frac{R^2 - r^2}{R}}$$

oder:

$$x_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{s}{b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 42)$$

Für den halbkreisförmigen Ringausschnitt mit $s = 2R$ und $b = R\pi$ wird:

$$x_1 = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 43)$$

Kreisabschnitt oder Segment.

Fig. 59.

Zerlegt man (Fig. 59) den Kreisausschnitt $CAMB = F$ durch die Sehne $AB = s$ in den Abschnitt $AMB = F_1$ und das Dreieck $ABC = F_2$, so läßt sich der Schwerpunktsabstand x_1 für den Abschnitt AMB ebenfalls mit Hilfe der Gl. 35) S. 42 bestimmen. Es ist:

$$F x_0 = F_1 x_1 + F_2 x_2$$

folglich:

$$x_1 = \frac{F x_0 - F_2 x_2}{F_1}$$

Durch Einsetzung der Werte:

$$F = \frac{br}{2}; \qquad F_2 = \frac{s}{2}\sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2}$$

$$x_0 = \frac{2}{3} \frac{rs}{b}; \qquad x_2 = \frac{2}{3}\sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2}$$

worin b die Länge des Bogens AB bedeutet, findet man:

$$x_1 = \frac{s^3}{12 F_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 44)$$

Für den Halbkreis ist $s = 2r$ und $F_1 = \frac{r^2\pi}{2}$. Durch Einsetzung dieser Werte ergibt sich, übereinstimmend mit Gl. 41):

$$x_1 = \frac{4r}{3\pi}$$

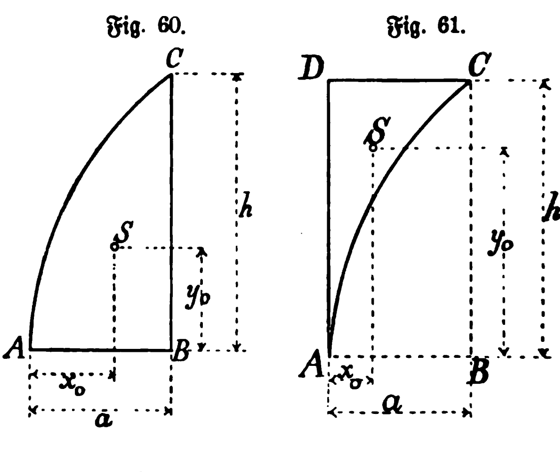
Parabelfläche.

Für den Schwerpunkt der Parabelfläche ABC mit Scheitel in A ergibt sich nach den Bezeichnungen in Fig. 60:

$x_0 = {}^3/_5\, a$ . . 45)

$y_0 = {}^3/_8\, h$ . . 46)

Für den Schwerpunkt der Figur ACD, welche die Parabelfläche ABC zu dem Rechtecke ABCD ergänzt (Fig. 61), ist:



$x_0 = {}^3/_{10}\, a$ . . . . 47)

$y_0 = {}^3/_4\, h$ . . . . 48)

Kugelzone und Kugelschale oder Kalotte.

Der Schwerpunkt liegt in der Mitte der Höhe.

Mantel der Pyramide und des Kegels.

Der Schwerpunkt liegt in der Verbindungslinie des Schwerpunktes der Grundfläche mit der Spitze und in $^1/_3$ der Höhe.

3. Schwerpunkte von Körpern.

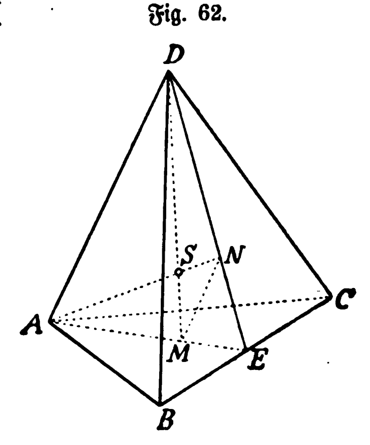
Prisma und Zylinder.

Der Schwerpunkt liegt in der Mitte der Verbindungslinie der Schwerpunkte der Endflächen.

Pyramide.

Denkt man sich die dreiseitige Pyramide (Fig. 62) durch Ebenen parallel der Grundfläche in sehr dünne Schichten zerlegt, so liegen deren Schwerpunkte sämtlich in der geraden Linie DM, welche den Schwerpunkt M der Grundfläche ABC mit der Spitze D verbindet; folglich muß in dieser Linie DM auch der Schwerpunkt S der ganzen Pyramide liegen. Betrachtet man ein anderes Mal BCD als Grundfläche und A als Spitze der Pyramide, so muß, wenn N der Schwerpunkt des Dreiecks BCD ist, der Schwerpunkt der Pyramide auch in der Linie AN liegen; er fällt daher mit dem Schnittpunkte S der in der Ebene ADE liegenden Geraden DM und AN zusammen.

Fig. 62.



Zieht man die Hilfslinie MN, so ist wegen:

$$EM = {}^1/_3\, AE$$

und:

$$EN = \frac{1}{3} DE$$

die Linie MN parallel zu AD; also $\triangle SNM \sim \triangle SAD$.

Daraus folgt:

$$MN = \frac{1}{3} AD$$

also auch:

$$MS = \frac{1}{3} SD = \frac{1}{4} MD$$

Die vielseitige Pyramide kann durch Ebenen, welche durch die Spitze gehen, in dreiseitige Pyramiden zerlegt werden, deren Schwerpunkte sämtlich in $\frac{1}{4}$ der Höhe, also in einer der Grundfläche parallelen Ebene liegen. In derselben Ebene liegt auch der Schwerpunkt der ganzen Pyramide; daher gilt allgemein:

Der Schwerpunkt einer Pyramide liegt in der Geraden, welche den Schwerpunkt der Grundfläche mit der gegenüberliegenden Spitze verbindet, und in $\frac{1}{4}$ der Höhe.

Kegel.

Der Schwerpunkt liegt in der Geraden, welche den Mittelpunkt des Grundkreises mit der Spitze verbindet, und in ein $\frac{1}{4}$ der Höhe wie bei der Pyramide.

Kugelausschnitt (Kugelsektor).

Indem man den Kugelausschnitt betrachtet als zusammengesetzt aus sehr vielen kleinen Pyramiden, deren Spitzen sämtlich im Mittelpunkte und deren Grundflächen in der Oberfläche der Kugel liegen, kann man den Schwerpunkt in ähnlicher Weise bestimmen, wie dieses bei dem Kreisausschnitt (Fig. 57) durchgeführt wurde.

Man erhält dann für den Abstand des Schwerpunktes vom Mittelpunkt der Kugel:

$$x_0 = \frac{3}{8} (2r - h) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 49)$$

worin r den Halbmesser der Kugel, h die Höhe der Kugelhaube bedeutet.

Für die Halbkugel ist $h = r$; folglich:

$$x_0 = \frac{3}{8} r \quad \ldots\ldots\ldots \quad 50)$$

Kugelabschnitt (Kugelsegment).

Der Schwerpunktsabstand x_0 vom Mittelpunkt der Kugel wird in derselben Weise bestimmt wie der Schwerpunktsabstand des Kreisabschnittes (Fig. 59), indem man den Kugelabschnitt als Unterschied von Kugelausschnitt und Kegel auffaßt.

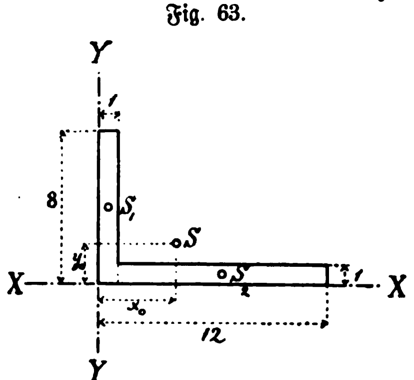
Ist r = Kugelhalbmesser, h = Höhe des Kugelabschnittes, so findet man:

$$x_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{(2r - h)^2}{3r - h} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 51)$$

Für die Halbkugel mit $h = r$ ergibt sich wieder wie in Gl. 50):

$$x_0 = {}^3/_8\, r$$

Fig. 63.



Aufgabe 45. Es soll der Schwerpunkt des ungleichschenkligen Winkeleisens Fig. 63 bestimmt werden.

Auflösung. Man denke sich das Winkeleisen aus 2 Rechtecken:

$$F_1 = 8 \,.\, 1 = 8 \text{ qcm}$$

und

$$F_2 = (12 - 1) \,.\, 1 = 11 \text{ qcm}$$

bestehend und wende den Satz an:

Das statische Moment des Ganzen ist gleich der Summe der statischen Momente der einzelnen Teile (Gl. 35, S. 42).

Werden die Abstände der Schwerpunkte S_1 und S_2 von der Achse XX mit y_1 und y_2; von der Achse YY mit x_1 und x_2 bezeichnet, so ist in bezug auf die Achse XX:

$$(F_1 + F_2)\, y_0 = F_1 y_1 + F_2 y_2$$
$$(8 + 11)\, y_0 = 8 \,.\, 4 + 11 \,.\, 05$$
$$y_0 = 1{,}97$$

In bezug auf die Achse YY ist:

$$(F_1 + F_2)\, x_0 = F_1 x_1 + F_2 x_2$$
$$(8 + 11)\, x_0 = 8 \,.\, 0{,}5 + 11 \,.\, 6{,}5$$
$$x_0 = 3{,}97$$

Mit Berücksichtigung der in Wirklichkeit vorhandenen Abrundungen ergibt sich:

$x_0 = 3{,}92$ cm $\qquad y_0 = 1{,}95$ cm*)

Aufgabe 46. Ein 1,2 m langer zylindrischer Holzstab ist mit einem gleich dicken zylindrischen Eisenstabe von 0,2 m Länge geradlinig verbunden. Das Gewicht des Holzstabes ist $G_1 = 1{,}4$ kg, das Gewicht des Eisenstabes $G_2 = 3{,}1$ kg. Wo liegt der Schwerpunkt des Ganzen?

Auflösung. In bezug auf die Schwerachse muß nach Gl. 36) S. 42 das statische Moment des Holzteiles gleich dem statischen Momente des Eisenteiles sein. Nach Fig. 64 ist daher:

$$G_1 x_1 = G_2 x_2$$

Fig. 64.

Da nun $x_1 + x_2$ = dem Abstande der beiden in der Mitte des Holz- bezw. Eisenteiles liegenden Schwerpunkte S_1 und S_2 ist, also:

$$x_1 + x_2 = \frac{1{,}2 + 0{,}2}{2} = 0{,}7$$

oder:

$$x_2 = 0{,}7 - x_1$$

so folgt:

$$G_1 x_1 = G_2\, (0{,}7 - x_1)$$

Durch Auflösung für x_1 erhält man:

$$x_1 = \frac{0{,}7 \,.\, G_2}{G_1 + G_2} = \frac{0{,}7 \,.\, 3{,}1}{1{,}4 + 3{,}1} = 0{,}48 \text{ m}$$

*) Siehe Lauenstein, Festigkeitslehre, 9. Aufl, Tab. S. 34.

§ 11.

Umdrehungsflächen und Umdrehungskörper (Guldinsche Regel).

Dreht sich eine ebene Kurve AB (Fig. 65) um eine in ihrer Ebene liegende Achse Y, so wird eine Umdrehungsfläche (Rotationsfläche) erzeugt.

Man denke sich die Kurve in sehr viele kleine Teile zerlegt. Ein Teilchen mn, dessen Entfernung von der Y-Achse x sein möge, erzeugt dann bei einer Umdrehung die Fläche:

$$f = mn \,.\, 2\,x\,\pi$$

Fig. 65.

Der Inhalt der von der ganzen Kurve erzeugten Fläche ist daher:

$$F = \Sigma(mn \,.\, 2\,x\,\pi) = 2\,\pi\,\Sigma(mn \,.\, x)$$

und da, wenn x_0 den Abstand des Schwerpunktes der Kurve von der Y-Achse bedeutet, nach S. 44:

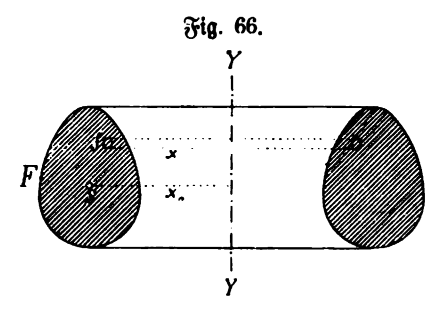
$$\Sigma(mn \,.\, x) = \widehat{AB} \,.\, x_0$$

gesetzt werden kann, so wird:

$$F = \widehat{AB} \,.\, 2\,x_0\,\pi \quad \ldots \ldots \ldots \quad 52)$$

In Worten: **Der Inhalt einer Fläche, welche durch Umdrehung einer ebenen Kurve um eine in ihrer Ebene liegende Achse erzeugt wird, ist gleich dem Produkte aus der Länge der Kurve und dem Wege ihres Schwerpunktes.**

Fig. 66.



Dreht sich eine ebene Fläche F (Fig. 66) um eine in ihrer Ebene liegende Achse Y, so entsteht ein Umdrehungskörper (Rotationskörper).

Man denke sich die ganze Fläche F aus sehr vielen kleinen Einzelflächenteilen zusammengesetzt. Ein Flächenteilchen f in der Entfernung x von der

Y-Achse erzeugt bei der Umdrehung einen ringförmigen Körper von dem Rauminhalt:

$$v = f \cdot 2 x \pi$$

Der Rauminhalt des von der ganzen Fläche erzeugten Körpers ist daher:

$$V = \Sigma (f \cdot 2 x \pi) = 2 \pi \Sigma (f x)$$

und wenn nach Gl. 35 S. 42:

$$\Sigma (f x) = F x_0$$

gesetzt wird, wobei x_0 den Schwerpunktsabstand der Fläche F von der Y-Achse bedeutet, so erhält man:

$$V = F \cdot 2 x_0 \pi \quad \ldots \ldots \ldots \quad 53)$$

In Worten: **Der Inhalt eines Körpers, welcher durch Umdrehung einer ebenen Fläche um eine in ihrer Ebene liegende Achse erzeugt wird, ist gleich dem Produkte aus dem Inhalt der Fläche und dem Wege ihres Schwerpunktes.**

Als Beispiel mögen folgende Fälle dienen:

Ein **Halbkreisbogen** vom Halbmesser r, dessen Durchmesser parallel der Y-Achse ist und die Entfernung a von derselben hat (Fig. 67), erzeugt nach Gl. 52) die Fläche:

$$F = r \pi \cdot 2 x_0 \pi$$

und da hier nach Gl. 38) S. 44:

$$x_0 = a + \frac{2r}{\pi}$$

so entsteht:

$$F = r \pi 2 \left(a + \frac{2r}{\pi}\right) \pi = 2 a r \pi^2 + 4 r^2 \pi$$

Für $a = 0$ ergibt sich als Oberfläche einer **Kugel**:

$$F = 4 r^2 \pi$$

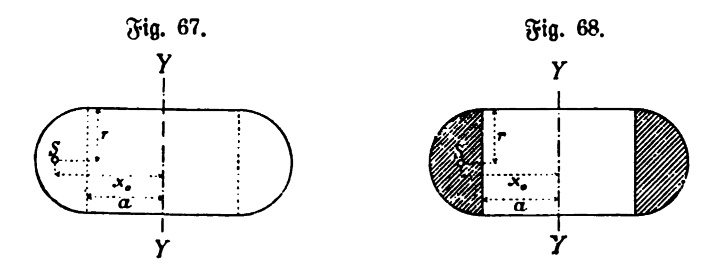


Fig. 67. Fig. 68.

Dreht sich statt eines Halbkreisbogens die volle **Halbkreisfläche** um die Y-Achse (Fig. 68), so entsteht nach Gl. 53) ein Körper von dem Rauminhalt:

$$V = \frac{r^2 \pi}{2} 2 x_0 \pi$$

Nach Gl. 41) S. 52 ist:

$$x_0 = a + \frac{4\,r}{3\pi}$$

also:

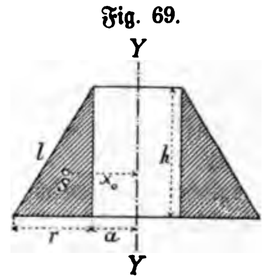
$$V = \frac{r^2\pi}{2}\, 2\left(a + \frac{4\,r}{3\pi}\right)\pi = a\,r^2\pi^2 + {}^4/_3\, r^3\pi$$

Hieraus folgt für $a = 0$ der Kugelinhalt:

$$V = {}^4/_3\, r^3\pi$$

Das rechtwinklige Dreieck Fig. 69 von der Grundlinie r und der Höhe h beschreibt bei der Drehung um die Y-Achse einen Raum, der sich ergibt aus Gl. 53), wenn eingesetzt wird:

Fig. 69.



$$F = \frac{r\,h}{2} \text{ und } x_0 = a + \frac{r}{3}$$

Man erhält:

$$V = \frac{r\,h}{2}\, 2\left(a + \frac{r}{3}\right)\pi = a\,h\,r\,\pi + r^2\pi\,\frac{h}{3}$$

und als Inhalt des Kegels (für $a = 0$):

$$V = r^2\pi\,\frac{h}{3}$$

Durch Drehung der Dreiecksseite l entsteht die Mantelfläche eines abgestumpften Kegels. Der Flächeninhalt desselben ergibt sich unter Einsetzung von:

$$x_0 = a + \frac{r}{2}$$

nach Gl. 52) zu:

$$F = 2\,l\left(a + \frac{r}{2}\right)\pi = 2\,a\,l\,\pi + r\,\pi\,l$$

Die Mantelfläche eines Kegels ($a = 0$) ist danach:

$$F = r\,\pi\,l$$

§ 12.

Widerstände fester Stützpunkte.

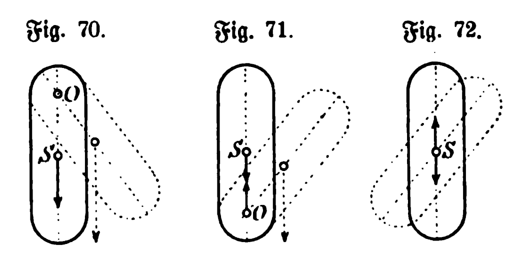
1. Ein Stützpunkt.

Wirkt auf einen Körper, welcher in einem einzigen Punkte O unterstützt ist, nur das im Schwerpunkte S angreifende Eigengewicht, so befindet sich der Körper im Gleichgewichte, wenn die Punkte O und S in einer Lotrechten liegen.

Wird der Körper aus seiner Gleichgewichtslage herausgebracht, so entsteht, da die Schwerpunktslotrechte nun nicht mehr durch den Stützpunkt O hindurch-

geht, ein statisches Moment, welches dem wieder losgelassenen Körper eine Drehung um den Punkt O erteilt. Je nachdem bei dieser Drehung das statische Moment des Eigengewichtes bestrebt ist, die frühere Gleichgewichtslage wiederherzustellen oder nicht, nennt man den anfänglichen Gleichgewichtszustand des Körpers entweder sicher (stabil) oder unsicher (labil).

Fig. 70. Fig. 71. Fig. 72.

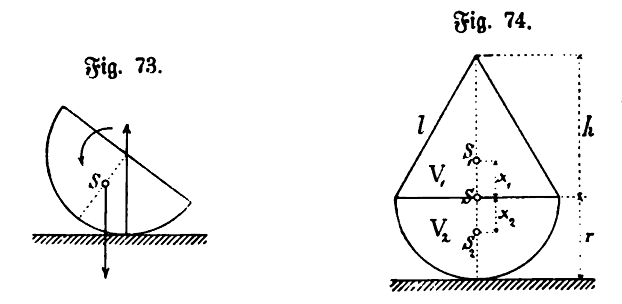


Bei dem sicheren Gleichgewichtszustande liegt der Schwerpunkt S lotrecht unter dem Befestigungspunkte (Fig. 70); bei dem unsicheren Gleichgewichtszustande lotrecht über dem Befestigungspunkte (Fig. 71).

Unentschieden (indifferent) heißt der anfängliche Gleichgewichtszustand, wenn der Körper nach jeder Lagenänderung in Ruhe bleibt, was der Fall ist, wenn der Schwerpunkt mit dem Befestigungspunkte zusammenfällt (Fig. 72).

Bei einem Körper, welcher sich mit kugelförmiger Fläche auf eine wagerechte Ebene stützt, liegt der Schwerpunkt immer über dem Stützpunkte. Ein solcher Körper wird, da der normale Gegendruck der Unterstützungsebene stets durch den Mittelpunkt der Kugel geht, sich im sicheren, unsicheren oder unentschiedenen Gleichgewichtszustande befinden, je nachdem der Schwerpunkt unter oder über dem Mittelpunkt der Kugel liegt oder mit diesem zusammenfällt.

Fig. 73. Fig. 74.



Eine homogene Halbkugel ist auf wagerechter Ebene daher immer im sicheren Gleichgewichte (Fig. 73).

Bei einem aus Halbkugel und Kegel zusammengesetzten homogenen Körper (Fig. 74) muß bei unentschiedenem Gleichgewicht S mit dem Mittelpunkt der Kugel zusammenfallen. Bedingung hierfür ist:

$$V_1 x_1 = V_2 x_2$$

oder:

$$r^2\pi \frac{h}{3} \cdot \frac{h}{4} = \frac{2}{3} \pi r^3 \cdot \frac{3}{8} r$$

folglich:

$$h^2 = 3r^2$$

Die Seite des Kegels wird danach:

$$l = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{3r^2 + r^2} = 2r$$

Für $l < 2r$ ist der Gleichgewichtszustand sicher (Fig. 75).
„ $l > 2r$ „ „ „ unsicher (Fig. 76).
„ $l = 2r$ „ „ „ unentschieden (Fig. 77).

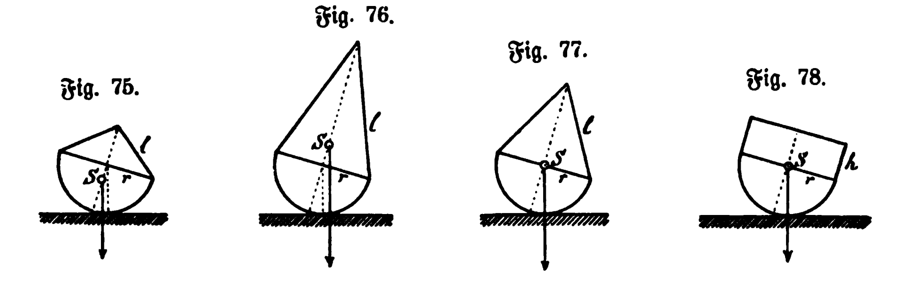


Fig. 75. Fig. 76. Fig. 77. Fig. 78.

In ähnlicher Weise findet man, daß ein aus Halbkugel und Zylinder zusammengesetzter homogener Körper (Fig. 78) sich im unentschiedenen Gleichgewichte befindet, wenn der zylindrische Teil die Höhe hat:

$$h = \frac{r}{\sqrt{2}}$$

2. Zwei Stützpunkte.

Wenn ein Körper in zwei Punkten A und B unterstützt wird, so ist im allgemeinen die Druckverteilung auf die Stützpunkte unbestimmt. Die Bedingung

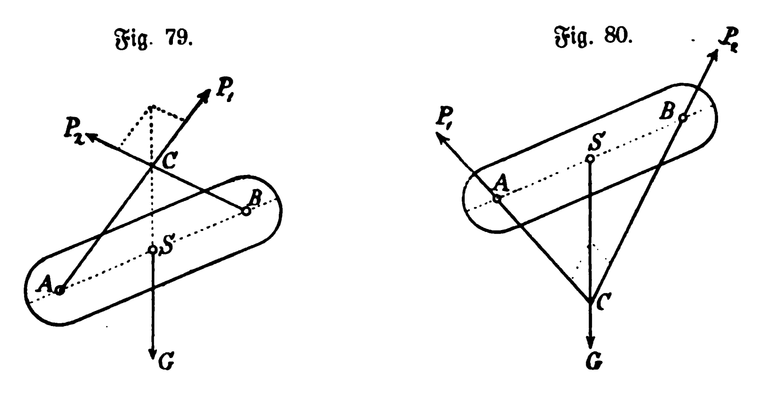


Fig. 79. Fig. 80.

des Gleichgewichtes ist, daß die Mittelkraft aus den Gegendrücken P_1 und P_2 mit dem Gewichte G des Körpers gleiche Größe und entgegengesetzte Richtung hat. (Vergl. Fig. 27 S. 33.) Diese Bedingung kann aber, da die Höhenlage des Punktes C, in welchem sich die drei Kräfte $P_1 P_2 G$ schneiden, nicht gegeben ist, auf unendlich viele verschiedene Arten erfüllt werden, wie z. B. die Fig. 79 und 80 erkennen lassen.

Fig. 81.

Die Unbestimmtheit schwindet, sobald die Richtung eines der Stützendrücke P_1 oder P_2 bekannt ist, weil dadurch der Punkt C, in welchem sich die Kräfte $P_1 P_2 G$ schneiden, und damit auch die Richtung des anderen Stützendruckes festliegt.

Ruht z. B. der Körper AB (Fig. 81) frei auf der Stütze A, so muß der daselbst wirkende Gegendruck P_1 winkelrecht zu AB gerichtet sein, und man erhält zur Bestimmung der Größe dieses Gegendruckes die Gleichung (Drehpunkt B):

$$P_1 \cdot \overline{AB} - G \cdot \overline{BD} = 0$$

oder:

$$P_1 = G \cdot \frac{BD}{AB}$$

Der Gegendruck P_2 ergibt sich aus der Gleichung der statischen Momente in bezug auf den Drehpunkt A:

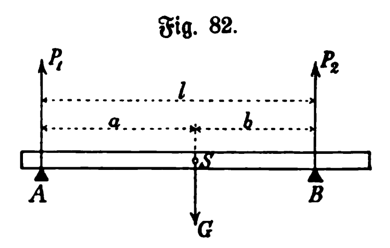
$$G \cdot \overline{AE} - P_2 \cdot \overline{AF} = 0$$

oder:

$$P_2 = G \cdot \frac{AE}{AF}$$

Liegt der Körper AB auf beiden Stützen wagerecht frei auf (Fig. 82), so sind beide Gegendrücke lotrecht gerichtet; sämtliche Kräfte sind also parallel. Ist l die Länge zwischen den Stützpunkten A und B, so erhält man zur Be-

Fig. 82.

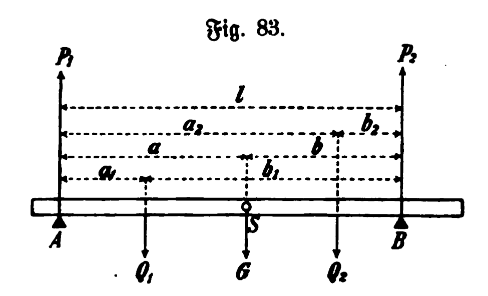


stimmung der Gegendrücke nach den Bezeichnungen der Fig. 82, indem man in bezug auf den Drehpunkt B, bezw. in bezug auf den Drehpunkt A die Gleichung der statischen Momente aufstellt:

$$P_1 l - G b = 0 \text{ oder } P_1 = G \frac{b}{l} \quad \ldots\ldots \quad 54)$$

$$G a - P_2 l = 0 \text{ oder } P_2 = G \frac{a}{l} \quad \ldots\ldots \quad 55)$$

Fig. 83.



Ist der in den Punkten A und B unterstützte Körper außerdem noch durch die Kräfte Q_1 und Q_2 belastet (Fig. 83), so erhält man in gleicher Weise:

$$P_1 l - Q_1 b_1 - G b - Q_2 b_2 = 0$$

oder:

$$P_1 = Q_1 \frac{b_1}{l} + G \frac{b}{l} + Q_2 \frac{b_2}{l} \quad \ldots\ldots \quad 56)$$

und:

$$Q_1 a_1 + G a + Q_2 a_2 - P_2 l = 0$$

oder:

$$P_2 = Q_1 \frac{a_1}{l} + G \frac{a}{l} + Q_2 \frac{a_2}{l} \quad \ldots\ldots \quad 57)$$

Der gleichartige Bau der Glieder auf der rechten Seite der Gleichungen 56) und 57) läßt erkennen, daß der Beitrag, den jede einzelne Kraft zu den Stützendrücken liefert, genau in derselben Weise zu bestimmen ist, als wenn diese Kraft die einzige auf den Körper AB wirkende Belastung wäre.

3. Die Standfestigkeit (Stabilität) der Körper.

Ein auf wagerechter Unterlage an drei Stellen unterstützter Körper ist standsicher, wenn die durch den Schwerpunkt gelegte Senkrechte innerhalb des Dreiecks fällt, welches durch geradlinige Verbindung der Stützpunkte gebildet wird. (Beispiel: dreibeiniger Tisch.)

Fällt der Schwerpunkt auf eine Dreiecksseite, so ist das Gleichgewicht ein unsicheres; läge er außerhalb des Dreiecks, so würde der Körper um eine der Dreiecksseiten gedreht werden und umkippen. Die betreffende Dreiecksseite bildet dann die Kippkante.

Bei einem auf wagerechter Unterlage an mehr als drei Stellen unterstützten Körper ist die Druckverteilung auf die Stützpunkte eine unbestimmte;

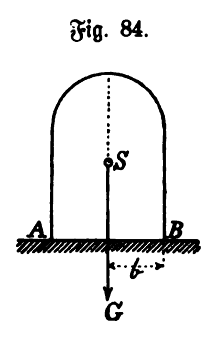


Fig. 84.

die Standfestigkeit des Körpers ist aber gesichert, wenn die Schwerpunktssenkrechte innerhalb der Kippkanten fällt, d. h. innerhalb derjenigen Geraden, welche durch die äußersten Stützpunkte gelegt werden können.

Ruht der Körper mit ebener Grundfläche auf der wagerechten Unterstützungsebene, so ist derselbe anzusehen als ein Körper mit unendlich vielen Stützpunkten.

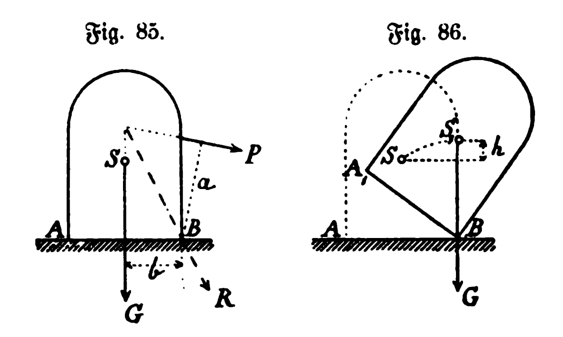
Das statische Moment des Körpergewichtes in bezug auf eine Kippkante nennt man das Standsicherheits-Moment (Stabilitätsmoment) des Körpers. Dasselbe ist um so größer, der Körper ist also um so gesicherter gegen Umsturz, je größer der kleinste Abstand der Schwerpunktssenkrechten von den Kippkanten ist.

Wird das Standsicherheitsmoment mit $\mathfrak{M}$ bezeichnet, so ist nach Fig. 84 in bezug auf die Kante B:

$$\mathfrak{M} = G b \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 58)$$

Wirkt auf den Körper (Fig. 85) außer dem Gewichte G noch eine in derselben Ebene liegende Kraft P, welche für sich allein eine Drehung des Körpers um die (festgehalten gedachte) Kante B hervorbringen würde, so wird ein Umstürzen des Körpers so lange nicht stattfinden, solange das Moment der

Fig. 85. Fig. 86.



Kraft P (das sogen. Umsturzmoment) kleiner ist als das Standsicherheitsmoment des Körpers in bezug auf die Kippkante B; solange also die Mittelkraft R aus G und P noch innerhalb der Kippkante B bleibt. Erreicht die Kraft P aber eine solche Größe, daß die Mittelkraft R durch die Kippkante hindurchgeht, so beginnt der Körper, sich um diese Kante zu drehen. Dieses ist der Fall, wenn:

$$P a = G b$$

oder:

$$P = G \cdot \frac{b}{a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 59)$$

Der Schwerpunkt S wird dabei gehoben, bis er seine höchste Stelle senkrecht über der Kippkante erreicht hat, in welchem Augenblicke sich der Körper im

unsicheren Gleichgewichte befindet (Fig. 86). Es ist dann keine weitere Kraft erforderlich, um den Körper vollends umzustürzen.

Die mechanische Arbeit $\mathfrak{A}$, welche die Kraft P verrichten muß, um den Körper aus der Ruhelage (Fig. 85) in die unsichere Gleichgewichtslage (Fig. 86) zu bringen, nennt man die dynamische Standsicherheit.

Ist h die Höhe, um welche der Schwerpunkt S dabei ansteigt (Fig. 86), so ist:

$$\mathfrak{A} = G h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 60)$$

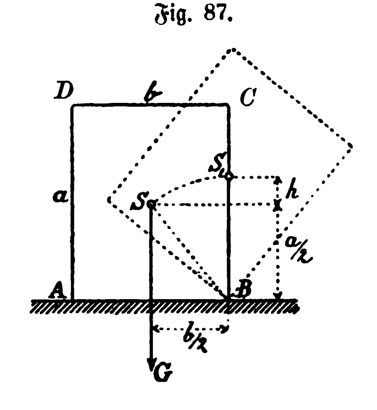


Fig. 87.

Aufgabe 47. Ein Granitblock ABCD (Fig. 87) hat a = 1 m Höhe, b = 0,8 m Breite und l = 2 m Tiefe. Wie groß ist dessen Standsicherheitsmoment; wie groß die mechanische Arbeit, um den Block umzukanten, wenn das Gewicht eines cbm: $\gamma = 2400$ kg ist?

Auflösung. Das Gewicht des Granitblockes beträgt:

$$G = \gamma \,.\, a b l = 2400 \,.\, 1 \,.\, 0{,}8 \,.\, 2 = 3840 \text{ kg}$$

Das Standsicherheitsmoment in bezug auf die Kante A oder B ist daher:

$$\mathfrak{M} = G \,.\, \frac{b}{2} = 3840 \,.\, \frac{0{,}8}{2} = 1536 \text{ mkg}$$

Das Maß, um welches beim Umkanten der Schwerpunkt S gehoben wird, beträgt:

$$h = \overline{BS_1} - \frac{a}{2} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - \frac{a}{2}$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}8}{2}\right)^2} - \frac{1}{2} = 0{,}14 \text{ m}$$

Folglich nach Gl. 60):

$$\mathfrak{A} = 3840 \,.\, 0{,}14 = 537{,}6 \text{ mkg}$$

§ 13.

Gleichgewicht zweier sich gegenseitig stützender belasteter Stäbe.

Es seien AC und BC (Fig. 88) zwei in einer Ebene liegende Stäbe, welche in A und B fest gelagert sind, in C sich aneinander anlehnen und in E_1 und E_2 durch Kräfte (z. B. Gewichte) G_1 und G_2 belastet sind. Die Punkte A, B, C sollen als Gelenkpunkte vorausgesetzt werden, die eine Drehung der Stäbe AC und BC in der Kraftebene gestatten.

Zur Bestimmung der in A und B wirkenden Gegendrücke K_1 und K_2 denke man sich zunächst nur die Kraft G_1 auf den Stab AC wirkend; den Stab BC dagegen unbelastet und gewichtslos (Fig. 89). Die Kraft G_1 erzeugt in C einen

Gegendruck W_2, welcher mit der Richtung des unbelasteten Stabes BC zusammenfallen muß, da dieser sonst um seinen Endpunkt B gedreht werden würde. Ist S_1 der Schnittpunkt von G_1 und W_2, so ergibt sich die Richtung des in A wirkenden Gegendrucks W_1 aus der Bedingung, daß die drei Kräfte G_1 W_1 W_2 sich in dem Punkte S_1 schneiden müssen; W_1 hat daher die Richtung AS_1. Die Größen von W_1 und W_2 erhält man aus dem in Fig. 89 angedeuteten Kräfteparallelogramm, dessen Diagonale gleich G_1 ist.

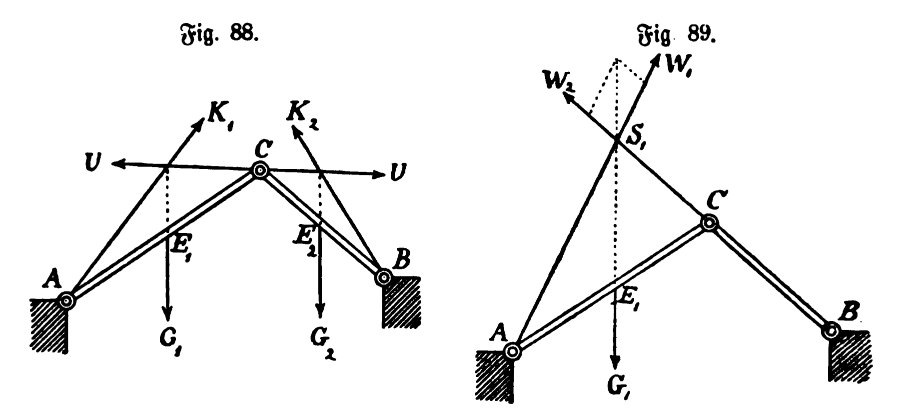


Fig. 88. Fig 89.

Denkt man sich ein anderes Mal nur den Stab BC durch die Kraft G_2 belastet, den Stab AC dagegen unbelastet und gewichtslos (Fig. 90), so erhält man in derselben Weise die durch G_2 allein erzeugten Gegendrücke D_1 und D_2, von denen D_1 mit der Richtung des jetzt unbelasteten Stabes AC zusammenfällt.

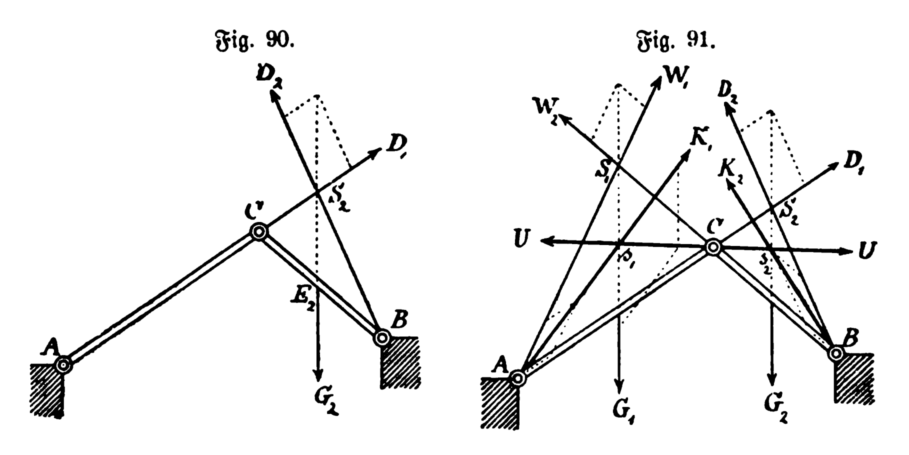


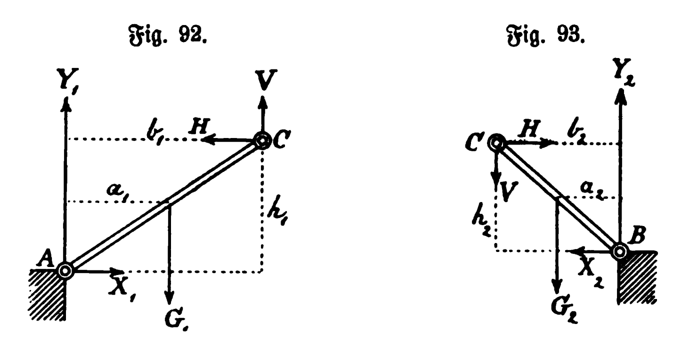
Fig. 90. Fig. 91.

Durch gleichzeitige Wirkung der Kräfte G_1 und G_2 entstehen in A und B Gegendrücke, welche sich zusammensetzen aus den durch G_1 bezw. G_2 einzeln hervorgerufenen Gegendrücken. Danach ist K_1 die Mittelkraft von W_1 und D_1; ebenso K_2 die Mittelkraft von W_2 und D_2 (Fig. 91).

Wird der Schnittpunkt von K_1 und G_1 mit s_1, der Schnittpunkt von K_2 und G_2 mit s_2 bezeichnet, so gibt die durch den Punkt C verlaufende Gerade $s_1 s_2$ die Richtung des Gegendruckes U an, den die beiden Stäbe in C gegenseitig aufeinander ausüben. Der Größe nach ist U gleich der Diagonale des aus den Kräften K_1 und G_1 bezw. K_2 und G_2 konstruierten Parallelogramms.

Sind die Stangen durch mehrere Kräfte belastet, so erfolgt die Bestimmung der Gegendrücke genau in derselben Weise. Man hat dann nur unter G_1 die Mittelkraft sämtlicher auf die Stange AC wirkender Einzelkräfte; unter G_2 die Mittelkraft sämtlicher auf die Stange BC wirkender Einzelkräfte zu verstehen. Dabei ist das eigene Gewicht einer Stange genau ebenso zu behandeln, wie eine im Schwerpunkte der (gewichtslos gedachten) Stange angehängte Last von gleicher Größe.

Fig. 92. Fig. 93.



Um den Gegendruck U auf rechnerischem Wege zu bestimmen, denke man sich denselben nach wagerechter und lotrechter Richtung in die Seitenkräfte H und V zerlegt (Fig. 92 und 93) und stelle für jeden der beiden Stäbe die Gleichung der statischen Momente auf, indem man jedesmal den festen Stützpunkt des Stabes als Drehpunkt wählt.

Nach Fig. 92 und 93 erhält man dann die Gleichungen:

$$G_1 a_1 - H h_1 - V b_1 = 0$$
$$- G_2 a_2 + H h_2 - V b_2 = 0$$

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$H = \frac{G_1 a_1 b_2 + G_2 a_2 b_1}{b_1 h_2 + b_2 h_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 61)$$

$$V = \frac{G_1 a_1 h_2 - G_2 a_2 h_1}{b_1 h_2 + b_2 h_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 62)$$

Wird hiernach die Kraft V negativ, so hat sie gerade die umgekehrte Richtung als in Fig. 92 und 93 angegeben; d. h. sie wirkt dann in Fig. 92 lotrecht abwärts, in Fig. 93 lotrecht aufwärts.

Denkt man sich auch den Gegendruck K_1 im Punkte A in die Seitenkräfte X_1 und Y_1 zerlegt, so erhält man nach den Gleichgewichtsbedingungen 1. und 2. S. 34:

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= H \\ Y_1 &= G_1 - V \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 63)$$

In derselben Weise erhält man für die Seitenkräfte des in B wirkenden Gegendruckes K_2:

$$\left.\begin{aligned} X_2 &= H \\ Y_2 &= G_2 + V \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 64)$$

Ist γ der Winkel, welchen der Gegendruck U, und sind α_1 und α_2 die Winkel, welche die Gegendrücke K_1 und K_2 mit der Wagerechten einschließen, so ergeben sich die Richtungen der Kräfte U, K_1, K_2 aus:

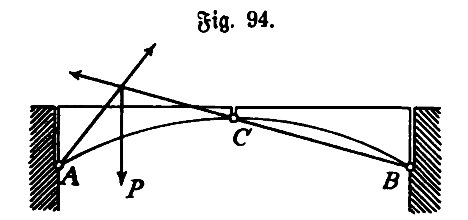
$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{V}{H};\ \operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{Y_1}{X_1};\ \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{Y_2}{X_2} \quad \ldots\ldots \quad 65)$$

Die Größe der Kräfte ergibt sich aus den Gleichungen:

$$U = \sqrt{H^2 + V^2};\ K_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2};\ K_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \quad 66)$$

Die beiden sich gegenseitig stützenden Stäbe wurden bei der obigen Durchführung der Einfachheit wegen als gerade Stäbe angenommen; jedoch ist dieses durchaus nicht erforderlich und gilt dasselbe auch für krummlinige Stäbe.

Fig. 94.



Überhaupt ist es für die Art und Weise der Bestimmung der Gegendrücke von keinem Einfluß, welche Gestalt die beiden sich stützenden Körper haben. So z. B. können nach dem oben gezeigten Verfahren auch die Gegendrücke bei einer Bogenbrücke mit drei Gelenken ermittelt oder auch die Beiträge bestimmt werden, die eine einzelne Belastung P zu den Gegendrücken liefert (Fig. 94).

In ähnlicher Weise werden auch bei der statischen Untersuchung der einseitig belasteten Gewölbe die Kämpferdrücke gefunden.*)

Aufgabe 48. Bei der in Fig. 95 dargestellten Stangenverbindung sei:

$G_1 = 500$ kg	$G_2 = 400$ kg
$a_1 = 1{,}4$ m	$a_2 = 0{,}4$ m
$b_1 = 2{,}0$ m	$b_2 = 0{,}9$ m
$h_1 = 1{,}0$ m	$h_2 = 0{,}8$ m

Es sollen die in den Punkten A, B, C hervorgerufenen Gegendrücke K_1, K_2, U durch Zeichnung und Rechnung der Größe und Richtung nach bestimmt werden.

*) Vergl. Lauenstein, Graphische Statik, 9. Aufl. § 22.

Auflösung. Durch Rechnung ergibt sich nach den Gleichungen 61) und 62):

$$H = \frac{500 \,.\, 1,4 \,.\, 0,9 + 400 \,.\, 0,4 \,.\, 2}{2 \,.\, 0,8 + 0,9 \,.\, 1} = 380 \text{ kg}$$

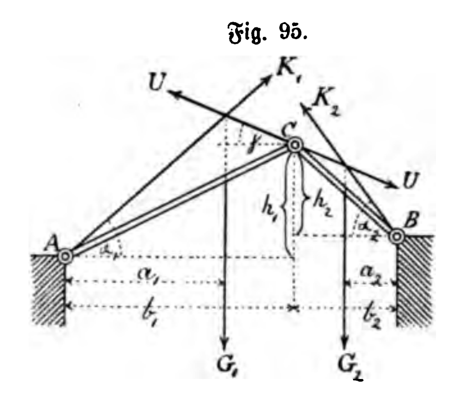
$$V = \frac{500 \,.\, 1,4 \,.\, 0,8 - 400 \,.\, 0,4 \,.\, 1}{2 \,.\, 0,8 + 0,9 \,.\, 1} = 160 \text{ kg}$$

und nach den Gleichungen 63) und 64):

$X_1 = 380$ kg $X_2 = 380$ kg

$Y_1 = 500 - 160 = 340$ kg $Y_2 = 400 + 160 = 560$ kg

Fig. 95.



Nach den Gleichungen 65) erhält man dann für die Tangenten der Winkel γ, α_1, α_2 die Werte:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{160}{380} = 0,421; \qquad \operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{340}{380} = 0,895; \qquad \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{560}{380} = 1,473$$

Diesen Werten entsprechen die Winkel:

$\gamma = 22^0 50'$ $\alpha_1 = 41^0 50'$ $\alpha_2 = 55^0 50'$

Die gesuchten Gegendrücke U, K_1, K_2 ergeben sich aus den Gleichungen 66):

$$U = \sqrt{380^2 + 160^2} = 412,3 \text{ kg}$$

$$K_1 = \sqrt{380^2 + 340^2} = 509,9 \text{ „}$$

$$K_2 = \sqrt{380^2 + 560^2} = 676,8 \text{ „}$$

Durch Zeichnung (Maßstab 1 : 10; Kräftemaßstab 100 kg = 1 cm) wurde gefunden:

$\gamma = 23^0$ U = 410 kg

$\alpha_1 = 42^0$ $K_1 = 510$ „

$\alpha_2 = 56^0$ $K_2 = 680$ „

§ 14.

Gleichgewicht der Kräfte bei den Maschinen.

Unter Maschine im allgemeinen versteht man eine mechanische Vorrichtung, durch welche die Naturkräfte gezwungen werden, unter gewissen Bedingungen zu wirken. Der eigentliche Zweck der Maschine ist, eine mechanische Arbeit zu

übertragen, d. h. eine in dieselbe eingeleitete mechanische Arbeit zu zwingen, eine andere, von ersterer verschiedene mechanische Arbeit zu verrichten. Die von der Maschine zu verrichtende Arbeit besteht darin, einen Widerstand zu überwinden, der gewöhnlich als Last bezeichnet wird im Gegensatz zu der dazu verwendeten Kraft. Bewegt sich die Last gleichförmig, so sind in jedem Augenblicke Kraft und Last an der Maschine im Gleichgewicht; die Maschine befindet sich dann im Beharrungszustande, und es ist die bewegende Arbeit gleich der widerstehenden Arbeit.

Die widerstehende Arbeit in ihrer Gesamtheit besteht aus der nützlichen Arbeit, d. h. derjenigen Arbeit, deren Verrichtung der eigentliche Zweck der Maschine ist, und der schädlichen Arbeit (Überwindung der Reibungen, des Luftwiderstandes, Erzeugung von Wärme usw.), und es ist daher die in die Maschine eingeleitete Arbeit (die Gesamtarbeit) stets größer als die Nutzarbeit. Das Verhältnis der letzteren zu der Gesamtarbeit nennt man den Wirkungsgrad oder das Güteverhältnis der Maschine; also:

$$\frac{\textbf{Nutzarbeit}}{\textbf{Gesamtarbeit}} = \textbf{Güteverhältnis.}$$

Bei den nachfolgenden Untersuchungen über die Bedingungen, unter denen bei den Maschinen Gleichgewicht zwischen Kraft und Last stattfindet, soll von den schädlichen Arbeiten vorläufig abgesehen werden.

Eine Maschine kann entweder derart eingerichtet sein, daß eine gewünschte Bewegung der Last, abweichend von der Bewegung des Angriffspunktes der Kraft, erzeugt wird, oder auch derart, daß durch eine kleinere Kraft ein größerer Widerstand überwunden oder eine größere Last gehoben wird. Da nun aber stets für den Gleichgewichtszustand die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last ist, so muß die Kraft in derselben Zeit einen sovielmal größeren Weg zurücklegen als die Last, sovielmal kleiner sie ist als letztere. Daraus folgt der wichtige Satz:

Was an Kraft gewonnen wird, geht an Geschwindigkeit (also an Zeit) verloren.

Eine Maschine ist im allgemeinen zusammengesetzt aus einzelnen Teilen, den Maschinenelementen oder Elementarmaschinen (sogen. mechanischen Potenzen), welche je nach der Art ihrer Bewegung auf zwei Grundformen zurückzuführen sind, und zwar auf den Hebel für drehende Bewegung und auf die schiefe Ebene für fortschreitende Bewegung. Abarten des Hebels sind das Wellrad und die Rolle; Abarten der schiefen Ebene die Schraube und der Keil.

1. Der Hebel.

Hebel nennt man jeden unbiegsamen, an einem Punkte unterstützten Körper, auf welchen Kräfte wirken, die denselben um den Stützpunkt oder Drehpunkt zu drehen suchen.

Liegt der Stützpunkt am Ende, so ist der Hebel einarmig (Fig. 96); liegt er zwischen den Angriffspunkten der Kräfte, zweiarmig (Fig. 97).

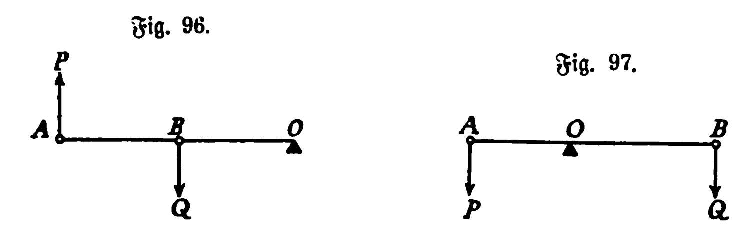


Fig. 96. Fig. 97.

Meistens hat der Körper die Gestalt einer geraden oder auch einer in einer Ebene liegenden, am Drehpunkt geknickten Linie (Fig. 98: **Winkelhebel**).

Fällt der Stützpunkt mit dem Schwerpunkte zusammen, so kann man den Hebel als einen gewichtslosen (**mathematischen**) betrachten. Ein Hebel, dessen Schwerpunkt nicht mit dem Stützpunkte zusammenfällt, ist ein sogen. **physischer Hebel**. Ein solcher kann ebenfalls als ein mathematischer Hebel behandelt werden, wenn sein Gewicht als eine im Schwerpunkt angreifende, senkrecht abwärts gerichtete Einzelkraft G in Rechnung gebracht wird (Fig. 99).

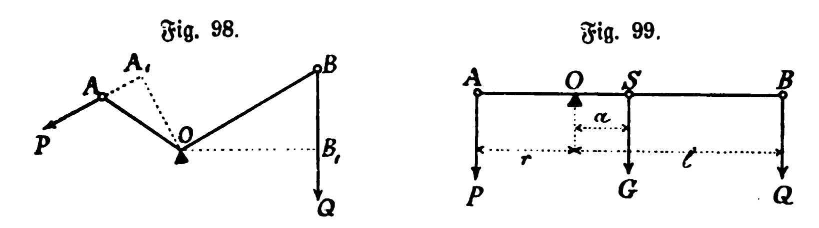


Fig. 98. Fig. 99.

Auf den mathematischen Hebel lassen sich die unter § 7 S. 34 aufgeführten Gleichgewichtsbedingungen anwenden. Für Fig. 99 z. B. ist nach der Gleichgewichtsbedingung 2. der Druck auf den Unterstützungspunkt O:

$$D = P + G + Q$$

und nach der Gleichgewichtsbedingung 3:

$$Pr = Ga + Ql \qquad \qquad 67)$$

Bei einem geradlinigen Hebel, auf welchen schief gerichtete, aber parallele Kräfte wirken, können statt der winkelrechten Abstände der Kräfte vom Drehpunkte auch unmittelbar die Hebelabschnitte in die Gleichgewichtsbedingung eingeführt werden. So ist für Fig. 100:

Fig. 100.

$$P \, . \, \overline{A_1 O} = Q \, . \, \overline{B_1 O}$$

oder:

$$\frac{P}{Q} = \frac{B_1 O}{A_1 O} = \frac{BO}{AO}$$

folglich:

$$P \, . \, AO = Q \, . \, BO$$

Bei einem Winkelhebel und bei einem geradlinigen Hebel, auf welchen nicht parallele Kräfte wirken, sind dagegen stets die winkelrechten Abstände

der Kräfte vom Stützpunkte als Hebelarme zu nehmen; also z. B. für Fig. 98:

$$P \,.\, \overline{A_1 O} = Q \,.\, \overline{B_1 O}$$

Auf den Gesetzen des Hebels beruht die Anwendung der Wagen.

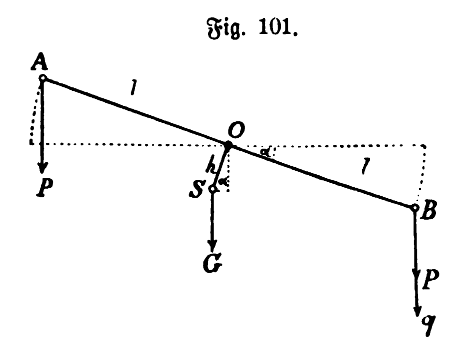
Eine gute gleicharmige Wage (Krämerwage) muß folgende Bedingungen erfüllen:

a) Sie muß richtig sein, d. h. bei gleicher Belastung der beiden Schalen muß der Wagebalken wagerecht bleiben. Dieses ist der Fall, wenn beide Arme genau gleich lang und symmetrisch ausgeführt sind und die Wagschalen gleiches Gewicht haben. Außerdem müssen die Aufhängepunkte der Schalen mit dem Drehpunkte des Wagebalkens in einer geraden Linie liegen.

b) Sie muß sich immer in sicherem Gleichgewicht befinden. Diese Bedingung wird erfüllt, wenn der Schwerpunkt bei der wagerechten Gleichgewichtslage des Wagebalkens senkrecht unter dem Unterstützungspunkte liegt.

c) Sie muß empfindlich sein, d. h. bei jeder beliebigen Belastung der Wage muß ein kleines Übergewicht in der einen Schale dem Wagebalken sofort einen zum Übergewichte in richtigem Verhältnis stehenden merklichen Ausschlag geben.

Fig. 101.



Bei der in Fig. 101 dargestellten Wage üben die gleichen Gewichte P keinen Einfluß auf die Gleichgewichtslage des Wagebalkens aus; durch das an einer Seite hinzugefügte Übergewicht q wird dagegen ein Ausschlagwinkel α hervorgebracht. Ist G das Eigengewicht der Wage, h der Abstand des Schwerpunktes S von der Drehachse O und l die Länge der Arme, so erhält man nach Fig. 101:

$$G \,.\, h \sin\alpha = q \,.\, l \cos\alpha$$

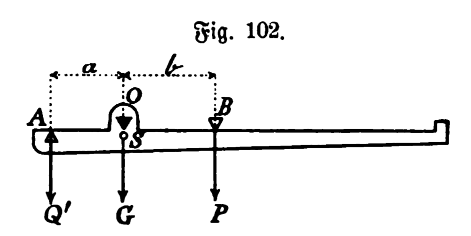
oder:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{q}{G} \cdot \frac{l}{h}$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, daß bei einem bestimmten Übergewicht q der Winkel α um so größer, die Wage also um so empfindlicher ist, je geringer das Eigengewicht G derselben; je weniger tief der Schwerpunkt unter dem Drehpunkte liegt, und je größer die Armlänge l ausgeführt wird.

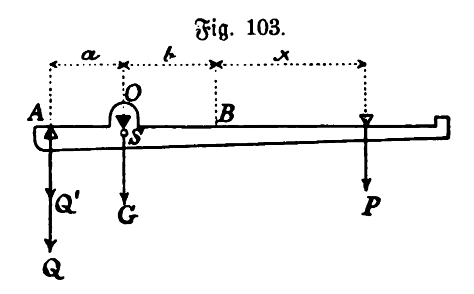
Die Empfindlichkeit einer Wage wird gewöhnlich ausgedrückt durch einen Bruch, dessen Zähler das kleinste, noch einen merklichen Ausschlag gebende Gewicht, und dessen Nenner die größte für die Wage zulässige Belastung ist. Eine gute Wage soll eine Empfindlichkeit von mindestens 1 : 60000 besitzen. Ist z. B. 30 kg die größte für die Wage zulässige Belastung, so muß, wenn jede Schale mit 15 kg belastet ist, durch ein Übergewicht von 0,5 g noch ein merklicher Ausschlag erzeugt werden.

Fig. 102.



Die Schnellwage ist ein ungleicharmiger Hebel, dessen längerer Arm ein verschiebbares bestimmtes Gewicht (Laufgewicht) P trägt, während am Ende des kürzeren Armes die Wagschale oder der Haken zum Anhängen der Last Q befestigt ist (Fig. 102 und 103).

Fig. 103.



Ist Q' das Gewicht des Hakens oder der Schale, so findet für die unbelastete Wage (Fig. 102) Gleichgewicht statt, wenn die Bedingung erfüllt ist:

$$P b = Q' a$$

Hieraus ergibt sich das Maß b, also auch die Lage des Punktes B, der als Nullpunkt auf der Wage zu verzeichnen ist.

Wird dann in A die Last Q angehängt, so wird der Gleichgewichtszustand dadurch wieder hergestellt, daß das Gewicht P um eine Strecke x nach außen verschoben wird (Fig. 103). Die Gleichgewichtsbedingung lautet dann:

$$P (b + x) = (Q + Q') a$$

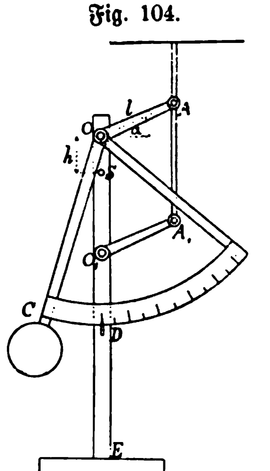
Durch Abzug der vorigen Gleichung von dieser letzteren folgt:

$$P x = Q a \text{ oder: } Q = \frac{P x}{a}$$

Durch Messen der Länge x kann danach das unbekannte Gewicht Q ermittelt werden oder wird an einer am Laufarme angebrachten Teilung direkt abgelesen.

Die Zeigerwage (Fig. 104), welche u. a. als Briefwage benutzt wird, besteht der Hauptsache nach aus dem Winkelhebel AOC mit dem Drehpunkt O. In der Gleichgewichtslage der unbelasteten Wage möge der Schenkel OA den Winkel α mit der Wagerechten bilden. Dabei weist der am Ständer OE befestigte Zeiger D auf den Nullpunkt der (mit dem Winkelhebel verbundenen) Bogenteilung.*) Der Schwerpunkt S der beweglichen Teile der Wage liegt um h senkrecht unter dem Drehpunkt O.

Fig. 104.



Durch eine Last Q wird der ganze Hebel AOC um den Winkel φ verdreht. Wird das Eigengewicht der Wage (ausschließlich Ständer und Fuß) mit G bezeichnet, so ist (Fig. 105):

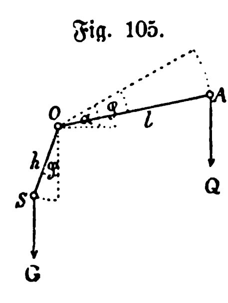
$$Q \,.\, l \cos(\alpha - \varphi) = G \,.\, h \sin \varphi$$

oder:

$$Q = G \cdot \frac{h}{l} \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}$$

Die Gewichtsbestimmung wird, da $G \cdot \frac{h}{l}$ für eine bestimmte Wage ein unveränderlicher Wert ist, hier also auf ein Winkelmessen zurückgeführt. Auf der Bogenteilung werden aber nicht die Zahlen für die Winkel selbst, sondern unmittelbar für die entsprechenden Gewichte angegeben.

Fig. 105.



Die gewöhnliche Einrichtung ist derart, daß der Hebel OA bei der Hälfte des für die Wage bestimmten größten Gewichtes wagerecht steht. Dadurch wird erreicht, daß die Abschnitte der Teilung von der Mitte ab nach beiden Seiten hin an Größe abnehmen,**) während, wenn bei der unbelasteten Wage AO wagerecht stände, die Teilung gleich vom Nullpunkt ab allmählich kleiner werden müßte. Dadurch würde aber das Gewicht der größeren Lasten sich nicht mit derselben Schärfe bestimmen lassen wie das der kleineren.

Bei der (regelmäßig ausgeführten) Parallelogrammkonstruktion $O A A_1 O_1$ kann die Last Q auf jede beliebige Stelle des Tellers gelegt werden. Fügt man nämlich in der Achsenrichtung $A A_1$ zwei sich gegenseitig aufhebende Kräfte Q hinzu (Fig. 106), so drückt die eine derselben (die abwärts gerichtete) die Hebel OA

*) Der Zeiger kann auch umgekehrt am Schenkel OC, sowie die Teilung am Gestell der Wage angebracht sein.

**) Die Winkel selbst wachsen nämlich nicht in demselben Verhältnis wie die Winkelfunktionen.

und $O_1 A_1$ unmittelbar nieder. Das außerdem entstehende Moment Qx wird im Gleichgewichte gehalten durch das entgegengesetzt drehende Moment der in der Richtung der Hebel OA und $O_1 A_1$ auftretenden Kräfte K, welche von den festen Drehpunkten O und O_1 aufgenommen werden.

Fig. 106.

Durch Verlängerung der Hebel AO und $A_1 O_1$ über die Punkte O und O_1 hinaus um die gleichen Stücke OB und $O_1 B_1$, also durch doppelte Anordnung der Parallelogrammkonstruktion unter gleichzeitiger Fortlassung des Hebels OC entsteht die in Fig. 107 abgebildete Tafelwage.

Die Brückenwage von Quintenz (Straßburg 1821) besteht im wesentlichen aus 3 Hebeln und 2 Zugstangen; nämlich (Fig. 108) aus dem zweiarmigen Hebel AC (Stützpunkt O), welcher in A die Gewichtsschale trägt, während in den Punkten B und C vermittelst der Zugstangen BD und CF die Endpunkte der einarmigen Hebel DE und FG angehängt sind. Der Stützpunkt E des Hebels DE befindet sich auf dem Hebel FG und hat eine solche Lage, daß für FG und OC dasselbe Teilungsverhältnis besteht; nämlich nach Fig. 108:



$$l : L = r : R$$

Fig. 107.

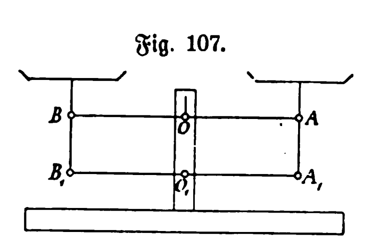
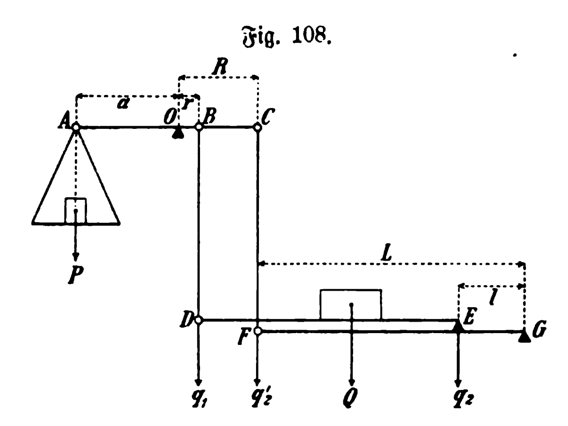


Fig. 108.



Bringt man nun eine Last Q auf die durch den Hebel DE unterstützte Brücke, so ist es gleichgültig, an welcher Stelle diese Last liegt; sie wird immer ihren Einfluß auf den Hebelarm OC so äußern, als ob sie unmittelbar am Punkte B aufgehängt wäre.

Sind nämlich q_1 und q_2 die Drücke, welche die Last Q auf die Punkte D und E ausübt, so ist das statische Moment von q_1 in bezug auf den Drehpunkt O:

$$\mathfrak{M}_1 = q_1 r$$

Die Kraft q_2 zerlegt sich in zwei Drücke, von denen der eine durch den Gegendruck des festen Punktes G aufgehoben wird, der andere in F angreifende aber die Größe hat:

$$q_2' = q_2 \frac{l}{L} = q_2 \frac{r}{R}$$

Diese Kraft wirkt am Hebelarme R; also ist das statische Moment derselben in bezug auf den Drehpunkt O:

$$\mathfrak{M}_2 = q_2 \frac{r}{R} \cdot R = q_2 r$$

Die Summe der statischen Momente der in B und C angreifenden Kräfte ist daher:

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = q_1 r + q_2 r$$

oder da:

$$q_1 + q_2 = Q$$

so wird:

$$\mathfrak{M} = Q r$$

Gewöhnlich ist $r = 0{,}1\,a$, so daß, da für den Gleichgewichtszustand:

$$P a = Q r$$

sein muß, das auf die Wagschale zu stellende Gewicht $P = Q \cdot \frac{r}{a} = 0{,}1\,Q$ wird (Dezimalwage).

Aufgabe 49. Bei dem doppelarmigen Hebel Fig. 99 S. 71 sei:

$$G = 6 \text{ kg}; \quad Q = 20 \text{ kg}$$
$$l = 1 \text{ m}; \quad r = 0{,}4 \text{ m}; \quad a = 0{,}1 \text{ m}$$

Wie groß muß P sein, um den Hebel im Gleichgewichte zu halten?

Auflösung. Nach Gl. 67) ist:

$$P = \frac{G a + Q l}{r} = \frac{6 \,.\, 0{,}1 + 20 \,.\, 1}{0{,}4} = 51{,}5 \text{ kg}$$

Der Druck auf den Unterstützungspunkt ist:

$$D = P + G + Q = 51{,}5 + 6 + 20 = 77{,}5 \text{ kg}$$

Aufgabe 50. Auf einen einarmigen Hebel mit dem Drehpunkt O wirke eine senkrecht aufwärts gerichtete Kraft von 200 kg am Hebelarm 12 cm. Wie groß muß das zur Herstellung des Gleichgewichtes im Abstande 80 cm vom Drehpunkte O angebrachte Gewicht P sein, wenn der Schwerpunkt des 5 kg schweren Hebels 32 cm von O entfernt ist?

Auflösung. Aus:

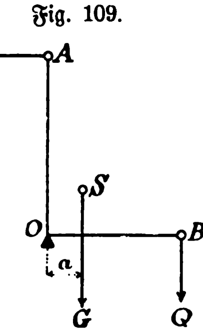
$$P \,.\, 80 + 5 \,.\, 32 = 200 \,.\, 12$$

folgt:

$$P = \frac{200 \,.\, 12 - 5 \,.\, 32}{80} = 28 \text{ kg}$$

Aufgabe 51. An einem 8 kg schweren Winkelhebel AOB (Fig. 109), dessen Arme OA = 80 cm und OB = 60 cm sind, wirkt in B die senkrecht abwärts ziehende Last Q = 30 kg. Es soll die Größe der in A angreifenden wagerechten Kraft P bestimmt werden, welche der Last Q und dem am Hebelarme a = 15 cm wirkenden Hebelgewichte G das Gleichgewicht hält. Ferner soll der Druck D auf den Unterstützungspunkt O berechnet werden.

Fig. 109.



Auflösung. Aus:

$$P \cdot 80 = 8 \cdot 15 + 30 \cdot 60$$

folgt:

$$P = 24 \text{ kg}$$

D ergibt sich als Diagonale des aus den Kräften P und Q + G konstruierten Parallelogramms zu:

$$D = \sqrt{(Q + G)^2 + P^2} = \sqrt{38^2 + 24^2} = \sim 45 \text{ kg}$$

Aufgabe 52. Eine 120 cm lange, 6,6 kg schwere prismatische Stange AB wird in A durch ein Gewicht P = 35 kg, in B durch ein Gewicht Q = 20 kg belastet. Wo muß die Stange unterstützt sein, um sich im Gleichgewicht zu befinden?

Auflösung. Bezeichnet man den unbekannten Abstand AO (vergl. Fig. 99 S. 71) mit r, so ist:

$$OS = a = 60 - r$$
$$OB = l = 120 - r$$

und man erhält nach Gl. 67):

$$35 \cdot r = 6{,}6\,(60 - r) + 20\,(120 - r)$$

oder:

$$r = 45{,}4 \text{ cm}$$

Aufgabe 53. Ein Körper wog in der einen Schale einer (unrichtigen) Krämerwage 3 kg, in der andern Schale 3,4 kg. Wie groß ist das richtige Gewicht Q des Körpers?

Auflösung. Bezeichnet man die Längen der beiden Arme des Wagebalkens mit l_1 und l_2, so hat man:

aus der ersten Wägung: $Q \cdot l_1 = 3 \cdot l_2$
„ „ zweiten „ : $Q \cdot l_2 = 3{,}4 \cdot l_1$
folglich: $Q^2 = 3 \cdot 3{,}4$

oder:

$$Q = \sqrt{3 \cdot 3{,}4} = 3{,}194 \text{ kg}$$

2. Das Wellrad.

Das Wellrad oder das Rad auf der Welle (Fig. 110) besteht in seiner einfachsten Form aus einem Rade, welches mit einer zylindrischen Walze (Welle) fest verbunden (verkeilt) ist, so daß beide eine gemeinsame geometrische Achse haben. Die Welle ist an ihren Enden mit Zapfen versehen, die durch Lager unterstützt sind und sich in diesen drehen.

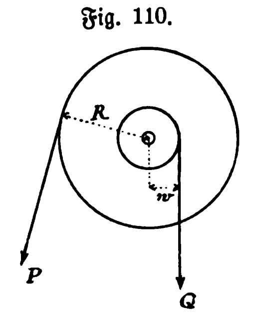
Die Welle kann wagerecht oder senkrecht angeordnet sein; das Rad als Schnurscheibe, Riemenscheibe oder Zahnrad konstruiert, auch durch eine Kurbel oder durch Speichen ersetzt sein.

Der Zweck des Wellrades ist, durch eine am Umfang des Rades angreifende Kraft P eine am Umfang der Welle wirkende Last Q im Gleichgewicht zu halten bezw. gleichförmig zu heben. Die Gleichgewichtsbedingung ist dieselbe wie beim zweiarmigen Hebel, wobei der Halbmesser des Rades als Hebelarm der Kraft, der Halbmesser der Welle als Hebelarm der Last zu betrachten ist.

Ist R der Halbmesser des Rades, w der Halbmesser der Welle, so ist:

$$P R = Q w$$

Fig. 110.



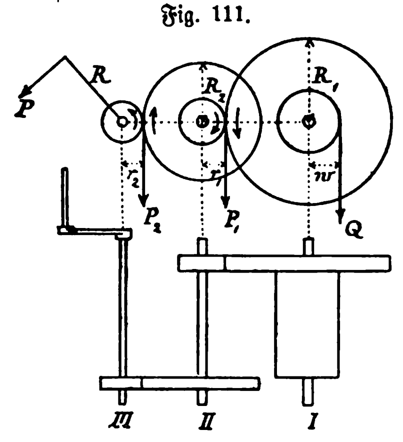
oder:

$$\frac{P}{Q} = \frac{w}{R} \quad \ldots \ldots \quad 68)$$

d. h.: die Kraft verhält sich zur Last wie der Halbmesser der Welle zum Halbmesser des Rades.

Statt am Umfang der Welle selbst kann die Last Q auch am Umfang einer auf der Welle befestigten Trommel wirken. Ferner kann die Kraft am Umfange des Rades zugleich Last für eine zweite Wellradvorrichtung sein, die mit ersterer derart in Verbindung steht, daß das Rad der ersten Welle die an seinem Umfange wirkende Kraft auf eine zweite Welle oder ein auf diese gesetztes Trieb überträgt. Auf diese Weise gelangt man zu einem zusammengesetzten Räderwerke, welches in Fig. 111 in einfachen Linien dargestellt ist.

Fig. 111.



Nach den Bezeichnungen der Fig. 111 ist die Gleichgewichtsbedingung

für die Welle I: $Q w = P_1 R_1$ oder $P_1 = \frac{Q w}{R_1}$

„ „ „ II: $P_1 r_1 = P_2 R_2$ „ $P_2 = \frac{P_1 r_1}{R_2}$

„ „ „ III: $P_2 r_2 = P R$ „ $P = \frac{P_2 r_2}{R}$

Setzt man in der letzten Gleichung für P_2 bezw. für P_1 die Werte aus den beiden anderen Gleichungen ein, so erhält man:

$$P = P_1 \frac{r_1}{R_2} \frac{r_2}{R} = Q \frac{w}{R_1} \frac{r_1}{R_2} \frac{r_2}{R}$$

oder:

$$\frac{P}{Q} = \frac{w}{R} \cdot \frac{r_1}{R_1} \cdot \frac{r_2}{R_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 69)$$

Da sich die Halbmesser der Räder wie die Umfänge verhalten, bei **Zahnrädern** aber die Umfänge wie die Zähnezahlen (denn ein Rad, dessen Umfang z. B. doppelt so groß als der eines anderen ist, hat auch doppelt so viel Zähne), so kann man statt der Verhältnisse $\frac{r_1}{R_1}$, $\frac{r_2}{R_2}$ in Gl. 69) bei Zahnrädern auch die Verhältnisse der betreffenden Zähnezahlen $\frac{z_1}{Z_1}$, $\frac{z_2}{Z_2}$ setzen.

Also ist auch:

$$\frac{P}{Q} = \frac{w}{R} \cdot \frac{z_1}{Z_1} \cdot \frac{z_2}{Z_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 70)$$

Nach S. 70 ist:

Arbeit der Kraft = Arbeit der Last.

Folglich, wenn v die Geschwindigkeit der Kraft, c die der Last bedeutet:

$$P v = Q c: \text{ oder: } c = \frac{P}{Q} v \quad \ldots \ldots \quad 71)$$

Aufgabe 54. Wie groß ist die Kraft P, welche eine Last Q = 500 kg im Gleichgewicht hält, wenn der Halbmesser des Rades R = 75 cm, derjenige der Trommel w = 15 cm ist?

Auflösung. Nach Gl. 68) ist:

$$P = Q \frac{w}{R} = 500 \cdot \frac{15}{75} = 100 \text{ kg}$$

Aufgabe 55. An einer an ihrem Ende mit einer Kurbel von 40 cm Halbmesser versehenen Welle hängt eine Last von 200 kg. Wie groß muß der Halbmesser w der Welle oder der Trommel sein, damit durch eine an der Kurbel wirkende Kraft von 32 kg die Last gleichförmig gehoben wird?

Auflösung. Nach Gl. 68) ist:

$$w = \frac{P R}{Q} = \frac{32 \cdot 40}{200} = 6{,}4 \text{ cm}$$

Aufgabe 56. Die Kurbel einer Winde hat 40 cm Halbmesser, das Trieb auf der Kurbelwelle 10 cm, das Rad auf der Trommelwelle 60 cm Halbmesser. Welche Last kann theoretisch durch 4 Arbeiter, von denen jeder 15 kg Druck ausübt, mit der Winde gehoben werden, wenn der Halbmesser der Trommel = 10 cm ist?

Auflösung. Entsprechend der Gl. 69) ist:

$$\frac{P}{Q} = \frac{w}{R} \cdot \frac{r_1}{R_1}$$

Gegeben ist:

$$P = 4 \cdot 15 = 60 \text{ kg}$$

$$w = 10; \qquad R = 40$$

$$r_1 = 10; \qquad R_1 = 60$$

folglich:

$$Q = P \cdot \frac{R}{w} \cdot \frac{R_1}{r_1} = 60 \cdot \frac{40}{10} \cdot \frac{60}{10} = 1440 \text{ kg.}$$

Aufgabe 57. Es soll eine Winde mit zwei Räderpaaren (doppeltem Vorgelege, Fig. 111) konstruiert werden, mit welcher eine Last $Q = 3000$ kg durch 4 Arbeiter gehoben werden kann. Dabei ist gegeben: Kraft eines Arbeiters an der Kurbel = 15 kg; Kurbelhalbmesser $R = 40$ cm; Halbmesser der Trommel (einschließlich halbe Seildicke) $w = 20$ cm. In welchem Verhältnis müssen die Halbmesser der Zahnräder zueinander stehen?

Auflösung. Die Kraft an der Kurbel ist:

$$P = 4 \cdot 15 = 60 \text{ kg}$$

folglich:

$$PR = 60 \cdot 40 = 2400 \text{ cmkg}$$

Das Moment der Last ist:

$$Qw = 3000 \cdot 20 = 60000 \text{ cmkg}$$

daher:

$$\frac{PR}{Qw} = \frac{2400}{60000} = \frac{1}{25}$$

Da nun nach Gl. 69):

$$\frac{PR}{Qw} = \frac{r_1}{R_1} \cdot \frac{r_2}{R_2}$$

so wird auch:

$$\frac{r_1}{R_1} \cdot \frac{r_2}{R_2} = \frac{1}{25}$$

Wie das Verhältnis $1/25$ in zwei Faktoren zerlegt wird, ist theoretisch zwar gleichgültig; praktisch ist es jedoch wünschenswert, die Faktoren einigermaßen gleich zu erhalten, z. B.:

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \text{ oder } = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{6{,}25}$$

Nimmt man die Geschwindigkeit der Kraft an der Kurbel zu $v = 0{,}8$ m an, so ist die Geschwindigkeit der Last oder die Hubgeschwindigkeit nach Gl. 71):

$$c = \frac{60}{3000} \cdot 0{,}8 = 0{,}016 \text{ m}$$

3. Die Rolle.

Die Rolle ist eine kreisförmige Scheibe, welche um eine rechtwinklig zu ihrer Ebene gerichtete und durch ihren Mittelpunkt gehende Achse drehbar ist und an ihrem Umfange eine zur Aufnahme des Seiles oder der Kette dienende rinnenförmige Vertiefung hat. Die Achse der Rolle ist an ihren beiden Enden in dem Rollengehäuse fest gelagert.

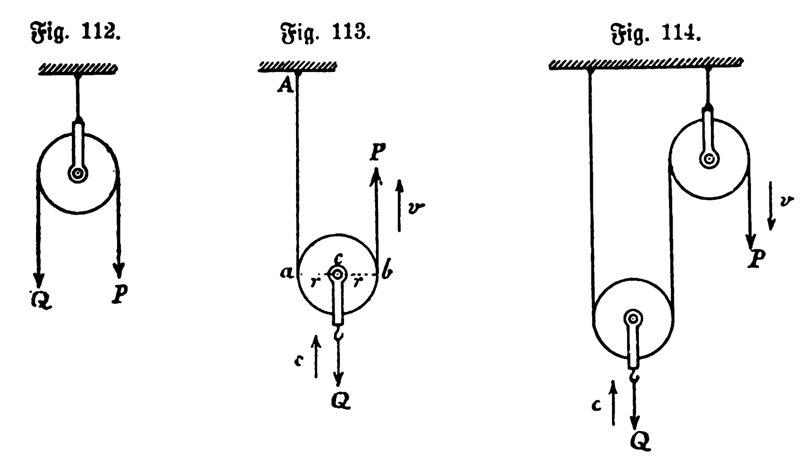
Man unterscheidet feste und lose Rolle.

Bei der festen Rolle ist das Rollengehäuse an einem unbeweglichen Punkte befestigt, so daß dieselbe keine fortschreitende, sondern nur eine Dreh-

bewegung ausführen kann (Fig. 112). An dem einen Seilende wirkt die Kraft, an dem anderen die Last; und da beide gleichen Abstand von der Drehachse haben, so muß für den Fall des Gleichgewichts die Kraft gleich der Last sein; also: P = Q.

Bei der festen Rolle wird an Kraft nichts gewonnen, und sie dient nur dazu, der Kraft eine andere Richtung zu geben (Leitrolle).

Die bewegliche oder lose Rolle führt außer der Drehbewegung noch eine fortschreitende Bewegung aus. Die Last Q hängt an einem Haken des Rollengehäuses und wird durch das Seil getragen, dessen eines Ende an einem unbeweglichen Punkte A befestigt ist, während an dem anderen Ende die Kraft P wirkt; entweder unmittelbar wie in Fig. 113, oder nachdem das Seil noch über eine feste Rolle geschlungen ist wie in Fig. 114.



Sind die beiden Seilenden einander parallel, so findet Gleichgewicht statt, wenn die Kraft halb so groß ist wie die Last. Dabei ist das Gewicht der losen Rolle nebst dem Gehäuse mit zu der Last zu rechnen; meistens kann dasselbe indessen als vergleichsweise klein im Verhältnis zu der zu hebenden Last unberücksichtigt bleiben.

Man kann die Wirkung der losen Rolle auf die Wirkung eines einarmigen Hebels zurückführen. Denkt man sich nämlich den Befestigungspunkt A (Fig. 113) des festen Seilendes nach dem Punkte a an den Umfang der Rolle verlegt, so kann man a als den Stützpunkt des Hebels ab betrachten. Es ist dann b der Angriffspunkt der Kraft P und c der Angriffspunkt der Last Q. Wird der Halbmesser der Rolle mit r bezeichnet, so muß bei Gleichgewicht sein:

$$P \, . \, 2r = Q \, . \, r$$

oder:

$$P = \tfrac{1}{2} Q \quad \ldots \ldots \ldots \quad 72)$$

Auch hier ist (wie stets) die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last.

Wird die Geschwindigkeit der Kraft mit v, die Geschwindigkeit der Last mit c bezeichnet, so ist:

$$P v = Q c; \text{ oder } \tfrac{1}{2} Q v = Q c$$

also:

$$c = \tfrac{1}{2} v \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 73)$$

d. h.: die Kraft legt in derselben Zeit den doppelten Weg zurück als die Last.

Vereinigt man eine feste mit mehreren losen Rollen (Fig. 115), so erhält man einen Rollenzug oder den sog. Potenzenzug. Die unterste Rolle trägt die Last Q, die Kraft P wirkt an dem über die feste Rolle geschlungenen Seilende. Die Spannung des Seiles, welches die unterste Rolle umschlingt, ist nach Gl. 72):

Fig. 115.

$$K_1 = \frac{Q}{2}$$

K_1 ist zugleich die Last für die zweite Rolle; folglich ist die Spannung des um die zweite Rolle geschlungenen Seiles:

$$K_2 = \frac{K_1}{2} = \frac{Q}{4} = \frac{Q}{2^2}$$

In derselben Weise erhält man:

$$K_3 = \frac{Q}{8} = \frac{Q}{2^3} = P$$

und allgemein bei n losen Rollen:

$$P = \frac{Q}{2^n} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 74)$$

Die Kraft P ist also gleich der Last Q, dividiert durch die sovielte Potenz von 2, als lose Rollen vorhanden sind. (Daher der Name Potenzenzug.)

Bei 4 losen Rollen kann z. B. durch eine Kraft P eine Last Q gehoben werden, welche $2^4 = 16$mal so groß als die Kraft ist; bei 5 losen Rollen wird:

$$Q = 2^5 P = 32 P$$

usw.

Aus der Gleichung: $P v = Q c$ ergibt sich wieder die Geschwindigkeit c der Last:

$$c = \frac{P}{Q} v = \frac{v}{2^n} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 75)$$

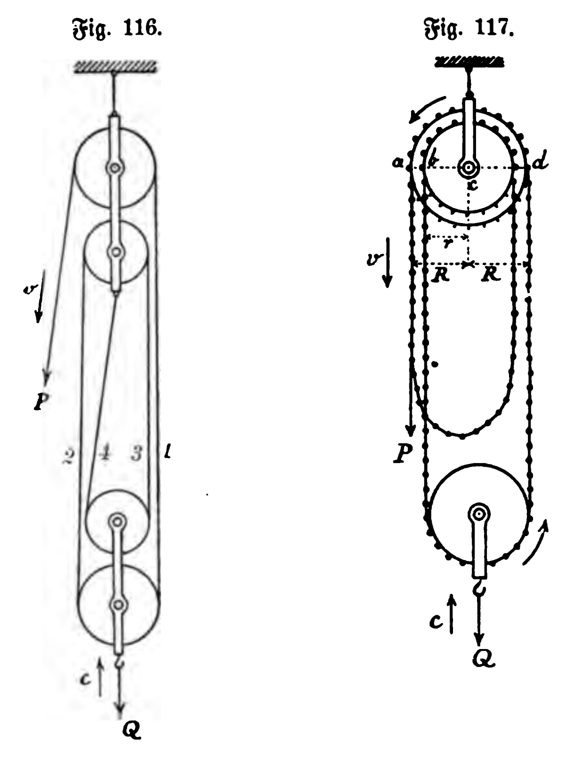
Obgleich bei dem Potenzenzug durch eine kleine Kraft eine verhältnismäßig große Last gehoben werden kann, so findet derselbe doch im allgemeinen wenig Anwendung.

Eine andere, praktisch viel wichtigere Verbindung von Rollen zu einer Hebevorrichtung ist der Flaschenzug (Fig. 116), bei welchem mehrere Rollen

in einem gemeinsamen Gehäuse (einer Flasche) entweder übereinander oder meistens nebeneinander drehbar befestigt sind. In Fig. 116 sind die Rollen der Deutlichkeit wegen übereinander gezeichnet.

Ein vollständiger Flaschenzug besteht aus einer oberen festen und einer unteren beweglichen Flasche; an letzterer hängt die Last Q. Das Seil ist an der oberen Flasche befestigt und läuft abwechselnd über je eine Rolle der unteren und oberen Flasche; am letzten freien Ende desselben wirkt die Kraft P.

Fig. 116. Fig. 117.



Hat die untere Flasche n Rollen, so wird die Last durch 2n Seile getragen, von denen jedes mit der Kraft P angespannt ist. Werden auch hier wieder die Reibungen vernachlässigt, welche später besonders behandelt werden (vergl. § 16), so erhält man als Gleichgewichtsbedingung:

$$Q = 2nP; \text{ oder: } P = \frac{Q}{2n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 76)$$

Die Kraft ist gleich der Last, dividiert durch die doppelte Anzahl der losen Rollen.

Aus $Pv = Qc$ folgt wieder für die Geschwindigkeit der Last:

$$c = \frac{P}{Q} \cdot v = \frac{v}{2n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 77)$$

Der Differentialflaschenzug besteht aus zwei miteinander verbundenen (gewöhnlich in einem Stück gegossenen) festen Rollen von verschiedenem Durchmesser und mit gemeinschaftlicher Achse und aus einer losen Rolle, an deren Haken die Last hängt (Fig. 117). Die festen Rollen sind mit Stegen versehen, die sich zwischen die Glieder der Kette legen und ein Gleiten derselben am Rollenumfang verhindern.

Beim Aufziehen der Last wickelt sich die endlose Kette an der einen Seite von der kleinen Rolle ab und zugleich an der anderen Seite auf der großen Rolle auf. Da die Spannung jedes dieser Kettenteile, die zusammen die Last Q zu tragen haben, $^1/_2$ Q beträgt, so ist, wenn man abcd als doppelarmigen Hebel mit dem Drehpunkte c ansieht, die Gleichgewichtsbedingung:

$$P \cdot \overline{ac} + {}^1/_2 Q \cdot \overline{bc} = {}^1/_2 Q \cdot \overline{cd}$$

oder wenn die Halbmesser der Rollen mit R und r bezeichnet werden:

$$PR + {}^1/_2 Qr = {}^1/_2 QR$$

woraus folgt:

$$P = \frac{Q}{2}\left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 78)$$

Aus der Bedingung:

$$Pv = Qc$$

ergibt sich die Geschwindigkeit der Last:

$$c = \frac{v}{2}\left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 79)$$

Ein wesentlicher Vorteil des Differentialflaschenzuges besteht noch darin, daß, wenn der Unterschied der Rollenhalbmesser R und r nicht zu groß ist, ein selbsttätiges Zurückgehen der Last durch die Widerstände allein verhindert wird. Es bedarf also keiner weiteren Kraft, um die Last in einer beliebigen Höhe zu halten. Meistens findet man bei den normalen Differentialflaschenzügen das Verhältnis:

$$\frac{r}{R} = \frac{11}{12}$$

Aufgabe 58. Welche Kraft ist erforderlich, um eine Last von 200 kg vermittelst einer losen, 6 kg schweren Rolle zu heben?

Auflösung. Nach Gl. 72):

$$P = \frac{Q + G}{2} = \frac{200 + 6}{2} = 103 \text{ kg}$$

Aufgabe 59. Eine Last von 400 kg soll mit einem Potenzenzug, der drei lose Rollen enthält, gehoben werden. Wie groß ist die erforderliche Kraft ohne Berücksichtigung des Rollengewichtes?

Auflösung. Nach Gl. 74) ist:

$$P = \frac{Q}{2^3} = \frac{400}{8} = 50 \text{ kg}$$

Aufgabe 60. Wenn in voriger Aufgabe das Gewicht jeder Rolle mit G = 6 kg berücksichtigt wird, wie groß ergibt sich dann die Kraft?

Auflösung. Zum Heben der Rollen allein ist eine Kraft erforderlich:

$$P_1 = \frac{G}{2} + \frac{G}{2^2} + \frac{G}{2^3} = \frac{G}{2^3}(1 + 2 + 2^2)$$

ist im ganzen erforderlich:

$$P = \frac{Q}{2^3} + P_1 = \frac{Q + 7G}{8} = \frac{400 + 7 \cdot 6}{8} = 55{,}25 \text{ kg*})$$

Aufgabe 61. Zwei Arbeiter, von denen jeder 75 kg wiegt, hängen sich an freie Seilende eines Flaschenzuges von 4 losen Rollen. Welche Last kann gehoben)en, wenn das Gewicht der Flasche mit 10 kg in Anrechnung gebracht wird; und verhalten sich dabei die Wege der Kraft und der Last?

Auflösung. Nach Gl. 76):

$$Q = 8P - G = 8 \cdot 150 - 10 = 1190 \text{ kg}$$

Nach Gl. 77) ist der Weg der Kraft achtmal so groß als der Weg der Last.

Aufgabe 62. Welche Last kann vermittelst eines Differentialflaschenzuges gehoben)en, wenn $\frac{r}{R} = \frac{11}{12}$ und $P = 50$ kg ist?

Auflösung. Nach Gl. 78) ist:

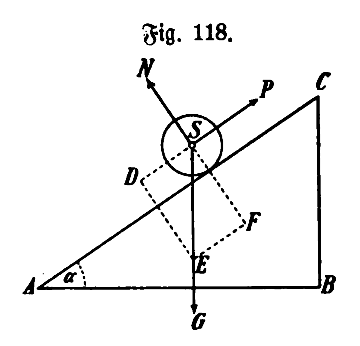
$$Q = \frac{2P}{1 - \frac{r}{R}} = \frac{2 \cdot 50}{1 - \frac{11}{12}} = 1200 \text{ kg}$$

4. Die schiefe Ebene.

Unter einer schiefen Ebene versteht man eine ebene Fläche, welche mit Wagerechten einen Winkel α bildet (Fig. 118). Wird von einem Punkte C elben das Lot CB auf die Wagerechte gefällt, so nennt man:

= l die Länge der schiefen Ebene
= b „ Grundlinie „ „ „
= h „ Höhe „ „ „

Fig. 118.



Befindet sich ein Körper auf der schiefen :ne und man zerlegt das im Schwer- :kte S angreifende Gewicht G desselben in i Seitenkräfte, von denen die eine SD Richtung AC parallel, die andere SF :twinklig dazu ist, so wird letztere durch Gegendruck N der schiefen Ebene auf- oben.

$$N = SF = DE$$

Unter der Einwirkung der Seitenkraft SD würde der Körper (abgesehen : den Reibungswiderständen) eine abwärts gerichtete, gleichförmig beschleunigte

---

*) Der allgemeine Ausdruck bei n losen Rollen lautet:

$$P = \frac{Q + (2^n - 1) \cdot G}{2^n}$$

Bewegung ausführen. Um daher den Körper im Gleichgewichte zu halten, bedarf es einer Kraft P, welche gleich, aber entgegengesetzt gerichtet der Seitenkraft SD ist; also:

$$P = SD$$

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke SDE und ABC folgt:

$$DE : SE = AB : AC$$

oder:

$$N : G = b : l$$

Der Normaldruck verhält sich zum Gewichte des Körpers wie die Grundlinie der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Aus der letzten Gleichung ergibt sich der Normaldruck:

$$N = G\frac{b}{l} = G \,.\, \cos\alpha \quad \ldots\ldots\ldots \quad 80)$$

Aus denselben Dreiecken SDE und ABC folgt ferner:

$$SD : SE = BC : AC$$

oder:

$$P : G = h : l$$

Die Kraft verhält sich zur Last (dem Gewichte des Körpers) wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Danach ergibt sich für die Kraft P:

$$P = G\frac{h}{l} = G \,.\, \sin\alpha \quad \ldots \quad 81)$$

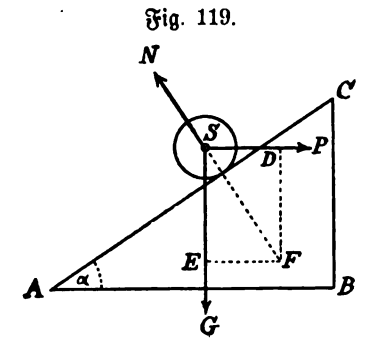


Fig. 119.

Wirkt die Kraft P, welche erforderlich ist, um den Körper im Gleichgewicht zu halten, dagegen parallel der Grundlinie AB (Fig. 119), so muß die Mittelkraft aus G und P rechtwinklig zu AC gerichtet sein. Zeichnet man das Kräfteparallelogramm SEFD, in welchem die Seite SE gleich dem Körpergewichte G ist, so stellt die Seite SD (= EF) die Größe der Kraft P; die Diagonale SF ($\perp$ AC) die Größe der Mittelkraft aus G und P dar, welche gleich dem normalen Gegendrucke N ist.

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke SEF und ABC folgt:

$$SF : SE = AC : AB$$

oder:

$$N : G = l : b$$

Der Normaldruck verhält sich zur Last wie die Länge der schiefen Ebene zu ihrer Grundlinie.

Der Normaldruck hat also die Größe:

$$N = G\frac{l}{b} = \frac{G}{\cos\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 82)$$

Ferner folgt aus denselben Dreiecken:

$$EF : SE = BC : AB$$

oder:

$$P : G = h : b$$

Die wagerechte Kraft P verhält sich zur Last wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Grundlinie.

Danach ist:

$$P = G\frac{h}{b} = G\,\mathrm{tg}\,\alpha \qquad \text{83)}$$

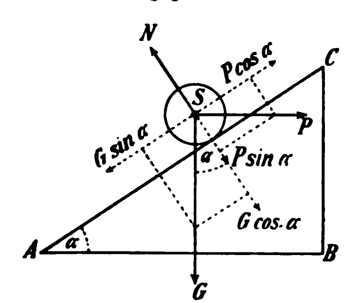
Dieselben Werte für P und N ergeben sich, wenn nach Fig. 120 die Kräfte G und P in ihre Seitenkräfte parallel AC und rechtwinklig zu AC zerlegt werden. Es ist dann:

$$P\cos\alpha = G\sin\alpha; \text{ oder: } P = G\,\mathrm{tg}\,\alpha$$

und:

$$N = P\sin\alpha + G\cos\alpha$$

Fig. 120.



oder wenn für P der obige Wert eingesetzt wird:

$$N = G\,\mathrm{tg}\,\alpha\sin\alpha + G\cos\alpha$$

$$N = G\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\sin\alpha + G\cos\alpha$$

und wenn das zweite Glied der rechten Seite auch auf den Nenner $\cos\alpha$ gebracht wird:

$$N = G\frac{\sin^2\alpha + \cos^2\alpha}{\cos\alpha} = \frac{G}{\cos\alpha}$$

Aufgabe 63. Auf einer schiefen Ebene, deren Grundlinie $b = 4$ m und deren Höhe $h = 3$ m ist, befindet sich eine Last $G = 200$ kg. Wie groß muß die Kraft P sein, welche die Last im Gleichgewicht hält, und wie groß ist der rechtwinklig zur schiefen Ebene gerichtete Gegendruck N

a) wenn die Kraft P parallel der schiefen Ebene wirkt?

b) wenn die Kraft P parallel der Grundlinie wirkt?

Auflösung. Da die Länge der schiefen Ebene:

$$l = \sqrt{b^2 + h^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ m}$$

beträgt, so ist

für a) nach Gl. 80): $N = 200 \cdot \frac{4}{5} = 160$ kg

„ „ 81): $P = 200 \cdot \frac{3}{5} = 120$ „

für b) nach Gl. 82): $N = 200 \cdot \frac{5}{4} = 250$ „

„ „ 83): $P = 200 \cdot \frac{3}{4} = 150$ „

Aufgabe 64. Wie groß muß eine wagerechte Kraft P sein, welche imstande ist, einen Güterwagen von 8000 kg Gewicht auf einer Bahnstrecke von 1 : 100 Steigung (d. h. die auf 100 m Länge um einen Meter ansteigt) am Herablaufen zu hindern?

Auflösung. Nach Gl. 83) ist:

$$P = 8000 \cdot \frac{1}{100} = 80 \text{ kg}$$

5. Die Schraube.

Wird die Ebene eines Winkels $\alpha = BAC$ (Fig. 121) so um einen geraden Kreiszylinder gewickelt, daß der eine Schenkel AB rechtwinklig zur

Fig. 121.

Zylinderachse liegt, so beschreibt der andere Schenkel AC eine Schraubenlinie. Ist die Länge AB gleich dem Umfang des Zylinders, so wird dabei der Punkt B auf A fallen und der Punkt C die Lage C_1 senkrecht über A annehmen. Die Entfernung AC_1, d. i. der Abstand je zweier Schraubenwindungen, heißt die Steigung oder Ganghöhe; der Winkel α ist der Steigungswinkel. Der zwischen den Punkten A und C_1 liegende Teil der Schraubenlinie $AabC_1$ bildet einen Schraubengang. Wickelt man weiter, in C_1 beginnend, ein dem Dreieck ABC gleiches Dreieck C_1CD auf dem Kreiszylinder auf, so beschreibt der Schenkel C_1D einen zweiten Schraubengang C_1cdD_1 usw.

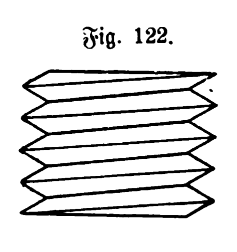


Fig. 122.

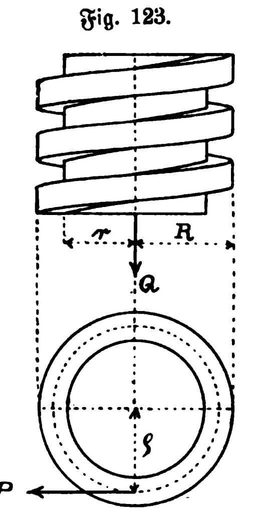


Fig. 123.

Bewegt sich nun ein gleichschenkliges Dreieck an der Schraubenlinie entlang auf dem Zylindermantel, so entsteht eine scharfgängige Schraube (Fig. 122); tritt an Stelle des Dreiecks ein Rechteck oder Quadrat, so entsteht die flachgängige Schraube (Fig. 123).

Eine vollständige Schraube besteht aus zwei Teilen. Der eine Teil mit erhabenem Gewinde bildet die eigentliche Schraube oder Schraubenspindel;

andere Teil mit vertieftem Gewinde, welches entsteht, wenn in einen hohlen inder längs der Schraubenlinie ein hohler Raum eingeschnitten wird, so die Schraube hineinpaßt, ist die Mutter.

Die scharfgängigen Schrauben finden hauptsächlich Verwendung als Be- gungsmittel; die flachgängigen Schrauben als Mittel, um eine drehende vegung in eine fortschreitende zu verwandeln (z. B. Schrauben bei Pressen g. 153), Leitspindeln bei Drehbänken). Dabei dreht sich die Spindel in Mutter, oder die Mutter um die Spindel, wobei entweder der eine oder andere Teil eine fortschreitende Bewegung ausführen kann.

Die Schraube kann nach der obigen Erklärung als eine um einen Zylinder vundene schiefe Ebene betrachtet werden, deren Grundlinie gleich dem Umfange Zylinders, und deren Höhe gleich der Ganghöhe der Schraube ist. Die ıft P wirkt in Fig. 123 tangential am Umfange der Schraube und parallel Grundlinie AB der schiefen Ebene; die Last Q senkrecht zu AB. Die ichgewichtsbedingung für die Schraube stimmt daher überein mit der in 83) S. 87 angegebenen Gleichgewichtsbedingung für die schiefe Ebene.

Ist der mittlere Halbmesser der Schraube $= \varrho = \frac{R + r}{2}$, also der fang derselben $= 2\varrho\pi$, so folgt aus Gl. 83):

$$P = Q\frac{h}{2\varrho\pi} = Q\,\mathrm{tg}\,\alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 84)$$

Zu der Gl. 84) gelangt man auch durch die Überlegung, daß während s Umganges der Weg der Kraft $= 2\varrho\pi$, der Weg der Last $= h$ beträgt; er:

$$P\,2\varrho\pi = Q\,h$$

muß, woraus wieder für P der obige Wert folgt.

Multipliziert man beide Seiten der Gl. 84) mit ϱ, so ergibt sich:

$$P\varrho = Q\varrho\frac{h}{2\varrho\pi}$$

rin kann das Moment $P\varrho$ der Kraft ersetzt werden durch irgend ein anderes chwertiges Moment Kl, wobei l die Länge eines einarmigen Hebels bedeutet, dessen Endpunkte die Kraft K angreift. Also:

$$Kl = Q\varrho\frac{h}{2\varrho\pi} = Q\varrho\,\mathrm{tg}\,\alpha \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 85)$$

Aufgabe 65. Mit einer Schraube, deren äußerer Durchmesser = 5 cm, deren rer Durchmesser = 4 cm und deren Ganghöhe = 1 cm ist, soll ein Druck von 5000 kg geübt werden. Wie groß ist die dazu erforderliche Kraft,

a) wenn dieselbe am Umfange des mittleren Schraubenhalbmessers angreift?

b) wenn sie an einem Hebelarme $l = 50$ cm wirkt?

Auflösung. Aus $R = 2{,}5$ cm und $r = 2$ cm ergibt sich der mittlere Schrauben- bmesser zu:

$$\varrho = \frac{2{,}5 + 2}{2} = 2{,}25 \text{ cm}$$

der Umfang zu:

$$2\varrho\pi = 14{,}137 \text{ cm}$$

für a) ist dann nach Gl. 84):

$$P = 5000 \cdot \frac{1}{14{,}137} = \sim 354 \text{ kg}$$

für b) nach Gl. 85):

$$K = \frac{5000}{50} \cdot 2{,}25 \cdot \frac{1}{14{,}137} = \sim 16 \text{ kg}$$

Der Steigungswinkel α ergibt sich aus:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{14{,}137} = 0{,}0707$$

zu: $\alpha = \sim 4^\circ$.

6. Der Keil.

Der Keil (Fig. 124) ist ein dreiseitiges Prisma, dessen Grundfläche entweder ein gleichschenkliges oder ein rechtwinkliges Dreieck bildet (doppelter und einfacher Keil), und welches als bewegliche schiefe Ebene betrachtet werden kann. Die Flächen AA_1C_1C und BB_1C_1C sind die Seiten, die Fläche AA_1B_1B ist der Rücken und die Mittellinie CD die Höhe des doppelten Keiles. Der einfache Keil wird dargestellt durch das Prisma $AA_1C_1CDD_1$.

Der Zweck des Keiles, welcher entweder als Befestigungsmittel dient oder zur Trennung zweier Flächen (z. B. beim Spalten eines Baumstammes) angewandt wird, besteht darin, durch eine am Rücken angreifende Kraft P zwei an den Seiten wirkende Widerstände oder Lasten Q zu überwinden.

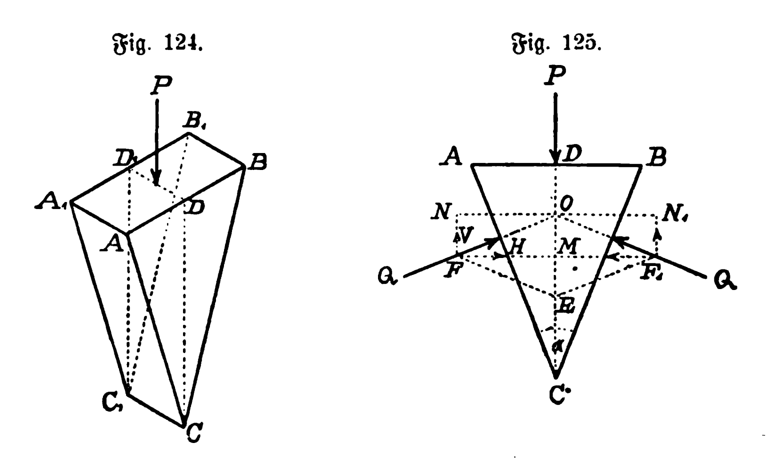


Fig. 124. Fig. 125.

Wirken die Widerstände oder Lasten Q rechtwinklig auf die Seiten AC und BC des doppelten Keiles (Fig. 125), und zerlegt man die Kraft $P = OE$ in die normal zu AC bezw. BC gerichteten Seitenkräfte OF und OF_1,

so muß für den Fall des Gleichgewichts jede derselben gleich der in entgegengesetzter Richtung wirkenden Last Q sein; daher:

$$P : Q = OE : OF$$

Da aber wegen Ähnlichkeit der Dreiecke OEF und ABC das Verhältnis besteht:

$$OE : OF = AB : AC$$

so folgt:

$$\mathbf{P : Q = AB : AC} \quad \dots\dots\dots \quad 86)$$

d. h.: Die Kraft verhält sich zur Last wie der Rücken des Keiles zur Seite.

Wird der Winkel bei C mit α bezeichnet, so ist auch:

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{1}{2}P}{Q}$$

woraus folgt:

$$\mathbf{P = 2Q\sin\frac{\alpha}{2}} \quad \dots\dots\dots \quad 87)$$

Zerlegt man die Lasten Q in die Seitenkräfte H ($\perp$ zu CD) und V ($\parallel$ CD), so ergibt sich aus der Ähnlichkeit der Dreiecke OFM und ACD:

$$Q : H = AC : CD$$

Durch Multiplikation dieser Gleichung mit Gl. 86) folgt dann:

$$\mathbf{P : H = AB : CD} \quad \dots\dots\dots \quad 88)$$

Trigonometrisch ergibt sich:

$$\mathbf{P = 2H\,tg\frac{\alpha}{2}} \quad \dots\dots\dots \quad 89)$$

Aufgabe 66. Bei einem doppelten Keile (Fig. 125) sei AB = 4 cm, AC = BC = 32 cm. Auf jede der beiden Keilseiten wirke normal zu denselben eine Last Q = 500 kg. Durch welche Kraft P werden diese Lasten im Gleichgewichte gehalten?

Auflösung. Nach Gl. 86) ist:

$$P = Q \cdot \frac{AB}{AC} = 500 \cdot \frac{4}{32} = 62,5 \text{ kg}$$

oder:

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{2}{32} = \frac{1}{16}$$

also auch nach Gl. 87):

$$P = \frac{2 \cdot 500}{16} = 62,5 \text{ kg}$$

§ 15.

Die Reibungswiderstände.

Nach dem Gesetze der Trägheit (§ 4 S. 14) würde ein in gleichförmig geradliniger Bewegung begriffener Körper seine Bewegung ohne weitere Einwirkung von Kräften unverändert fortsetzen. Die Erfahrung lehrt jedoch, daß dieses in Wirklichkeit nicht der Fall ist, daß vielmehr die Geschwindigkeit des Körpers sich nach und nach verlangsamt und schließlich die Größe Null erreicht, so daß der Körper zur Ruhe kommen wird. Diese Erscheinung findet ihren Grund in dem Vorhandensein von Widerständen, die sich der Bewegung entgegensetzen und überwunden werden müssen.

Die Widerstände sind wesentlich zweierlei Art; nämlich:

a) Widerstand des Mediums oder Mittels, d. h. der tropfbaren oder gasförmigen Flüssigkeit, in welcher sich der Körper bewegt.

b) Der Reibungswiderstand, welcher entsteht, wenn ein Körper sich auf einem anderen fortbewegt. Da nämlich die Oberflächen der Körper auch bei der sorgfältigsten Bearbeitung niemals vollkommen glatt sind, so sinken, wenn die Körper nur den geringsten Druck gegeneinander ausüben, die Erhöhungen der einen in die Vertiefungen der anderen Oberfläche ein, und die beiderseits vorspringenden Teilchen müssen bei der Bewegung des einen Körpers auf dem anderen entweder losgerissen oder verschoben werden.

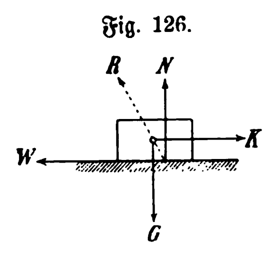
Man unterscheidet gleitende Reibung, zu welcher auch als besondere Art die Zapfenreibung zu rechnen ist, und die rollende Reibung. Die Ketten- und Seilbiegungs-Widerstände sind ebenfalls auf die Reibung zurückzuführen, da bei der Kette der Biegungswiderstand durch die Reibung der einzelnen Kettenglieder, beim Seil durch die Reibung der einzelnen Litzen oder Drähte aneinander erzeugt wird.

Der Widerstand des Mittels ist in Abschnitt VII behandelt.

1. Gleitende Reibung.

Bewegt sich ein Körper auf einer Unterlage, so tritt die Reibung zwischen den Berührungsflächen als eine Kraft auf, welche der Bewegung entgegengesetzt gerichtet ist, und zu deren Überwindung eine andere Kraft in der Bewegungsrichtung tätig sein muß, wenn die Geschwindigkeit des Körpers unverändert erhalten werden soll.

Fig. 126.



Bei einer wagerechten Unterlage ist der dem Gewichte G des Körpers gleiche Gegendruck N lotrecht aufwärts gerichtet. Um daher den Körper im Gleichgewichte zu halten, ist zur Überwindung des Reibungswiderstandes W noch eine besondere Kraft K

erforderlich (Fig. 126), die um so größer sein muß, je größer W ist. Erfahrungsgemäß ist der Reibungswiderstand W abhängig von dem Normaldruck N, und zwar ist:

$$W = fN \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 90)$$

$f = \frac{W}{N}$ heißt der **Reibungskoeffizient** oder **Reibungsziffer**, und Gl. 90) lautet danach in Worten:

Reibungswiderstand = Reibungskoeffizient × Normaldruck.

Der Reibungskoeffizient ist abhängig:

a) **Vom Materiale** der aufeinander gleitenden Körper. Je härter das Material, um so **kleiner** ist im allgemeinen die Reibung. Dabei zeigt sich, daß zwischen **ungleichartigen** Körpern die Reibung kleiner ist, als (unter gleichen Umständen) zwischen **gleichartigen**.

b) **Von der Beschaffenheit der Oberflächen.** Je glatter die Oberflächen der Körper bearbeitet und je sorgfältiger geschmiert sind, desto **kleiner** ist der Reibungskoeffizient.

c) **Von der Geschwindigkeit des Gleitens.** Je **kleiner** die Geschwindigkeit, desto **größer** ist der Reibungskoeffizient f. Bei der Geschwindigkeit Null, d. h. beim Übergange aus Ruhe in Bewegung oder umgekehrt, erreicht f seinen größten Wert und wird dann der **Reibungskoeffizient der Ruhe** genannt (siehe Anhang Tabelle I).

Der Reibungskoeffizient läßt sich vermittelst einer schiefen Ebene AB (Fig. 127) bestimmen, deren Neigungswinkel φ gegen die Wagerechte eine solche Größe hat, daß ein auf die Ebene gebrachter Körper sich mit unveränderter Geschwindigkeit abwärts bewegt. Zerlegt man das Gewicht G des Körpers in die Seitenkräfte $G \sin \varphi$ ($\parallel AB$) und $G \cos \varphi$ ($\perp AB$), so wird die letztere aufgehoben durch den normalen Gegendruck N, also:

$$N = G \cos \varphi$$

Die Seitenkraft $G \sin \varphi$ würde für sich allein eine beschleunigte Abwärtsbewegung des Körpers erzeugen; dieser Bewegung wirkt aber der Reibungswiderstand:

$$W = fN = fG \cos \varphi$$

entgegen, und für den Fall des Gleichgewichtes erhält man die Bedingung:

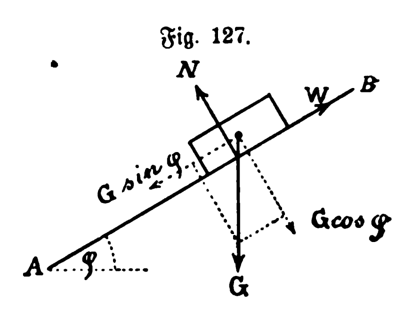
$$fG \cos \varphi = G \sin \varphi$$

oder:

$$f = \operatorname{tg} \varphi \quad . \; . \; . \; . \quad 91)$$

Den Winkel φ nennt man den **Reibungswinkel**. Nach Gl. 91) ist also **der Reibungskoeffizient gleich der Tangente des Reibungswinkels.**

Fig. 127.



Bezeichnet v die Geschwindigkeit des Körpers, so ergibt sich der Effekt E, welcher durch Reibung aufgezehrt wird:

$$E = W v = f N v \quad \ldots \ldots \ldots \quad 92)$$

2. Zapfenreibung.

Bei der Drehung eines durch den Druck P belasteten zylindrischen Tragzapfens einer Achse oder Welle in seinem Lager entsteht am Zapfenumfange ein der Drehbewegung entgegengesetzt gerichteter Reibungswiderstand (Fig. 128):

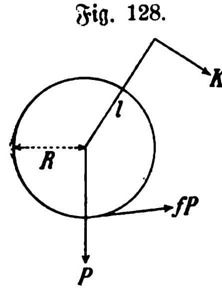
$$W = f P \quad \ldots \ldots \ldots \quad 93)$$

Das Moment desselben oder das Reibungsmoment ist:

$$\mathfrak{M} = f P R \quad \ldots \ldots \ldots \quad 94)$$

zu dessen Überwindung ein entgegengesetzt drehendes Kraftmoment K l erforderlich ist.

Fig. 128.



Ist v die Umfangsgeschwindigkeit des Zapfens, so ist nach Gl. 92) die durch Zapfenreibung während einer Sekunde verbrauchte Arbeit oder der Effektverlust:

$$E = W v = f P v \quad \ldots \quad 95)$$

oder Arbeitsverlust, ausgedrückt in Pferdekräften:

$$N = \frac{f P v}{75} \quad \ldots \ldots \quad 96)$$

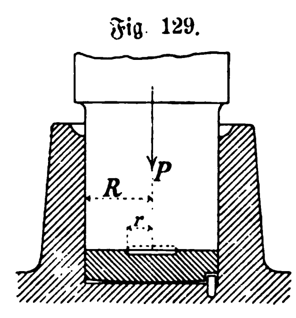
Bei einem Spur- oder Stützzapfen, bei welchem der Zapfendruck P in der Richtung der Achse wirkt, liegt, wenn die Stützfläche eine Ringfläche bildet (Fig. 129), das Reibungsmoment zwischen den Grenzwerten f P R und f P r und wird allgemein ausgedrückt durch:

$$\mathfrak{M} = f P \varrho \quad \ldots \ldots \ldots \quad 97)$$

worin ϱ einen von der Druckverteilung abhängigen Hebelarm bedeutet, welcher kleiner als R und größer als r ist.

Bei neuen Zapfen, welche sich mit der ganzen unteren Fläche voll auf die unterstützende Spurplatte aufsetzen, kann man gleichmäßige Druckverteilung annehmen, so daß bei einem Ringausschnitte der Druckmittelpunkt mit dem Schwerpunkte des Ausschnittes zusammenfällt. Der Abstand des Schwerpunktes desselben vom Kreismittelpunkt ist nach Gl. 42) S. 53:

Fig. 129.



$$\varrho = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{s}{b}$$

Für einen sehr schmalen Ringausschnitt (Fig. 130) kann man genügend genau die Sehne s gleich dem Bogen b setzen und erhält dadurch:

$$\varrho = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2},$$

folglich wird dann nach Gl. 97) das Reibungsmoment:

$$\mathfrak{M} = {}^2/_3 f P \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 98)$$

Für $r = 0$, wenn also die Stützfläche ein voller Kreis ist, ergibt sich:

$$\mathfrak{M} = {}^2/_3 f P R \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 99)$$



Fig. 130. Fig. 131.

Beim eingelaufenen Zapfen findet keine gleichmäßige Druckverteilung mehr statt. Wegen der größeren Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Flächenteilchen nämlich ist auch hier die Abnutzung größer als bei den mehr nach innen zu liegenden Teilchen, so daß schon nach kurzer Zeit der Druck auf die Flächeneinheit von innen nach außen hin abzunehmen beginnt. Dieses wird sich so lange fortsetzen, bis überall gleiche Abnutzung stattfindet; der Zapfen also, wie man sich ausdrückt, vollständig eingelaufen ist. Es tritt dann keine weitere Veränderung in der Druckverteilung mehr ein.

Man kann annehmen, daß beim eingelaufenen Zapfen der Druck auf die Flächeneinheit umgekehrt proportional der Geschwindigkeit ist; also auch umgekehrt proportional der Entfernung vom Zapfenmittelpunkt. Bezeichnet man den Druck am äußeren Umfange der Ringfläche (Halbmesser R) mit p_a, den Druck am inneren Umfang (Halbmesser r) mit p_i, so ist:

$$\frac{p_a}{p_i} = \frac{r}{R} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 100)$$

Denkt man sich nun einen sehr schmalen Ausschnitt der Ringfläche (Fig. 131) durch konzentrische Kreise in einzelne Ringstücke von der gleichen sehr kleinen Breite $\triangle$ zerlegt, so ist der Druck auf das äußere Ringstück $= p_a R \alpha \triangle$; der Druck auf das innere Ringstück $= p_i r \alpha \triangle$. Da aber nach Gl. 100):

$$p_a R = p_i r$$

ist, so erhalten beide Ringstücke den gleichen Druck. Da dasselbe für alle zwischenliegenden Ringstücke gilt, so folgt, daß die Mittelkraft der Drücke für sämtliche Ringstücke gerade in der Mitte liegt, also den Abstand:

$$\varrho = \frac{R + r}{2}$$

vom Mittelpunkte haben muß.

Man erhält danach bei dem eingelaufenen Ringzapfen nach Gl. 97) für das Reibungsmoment:

$$\mathfrak{M} = fP \cdot \frac{R + r}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 101)$$

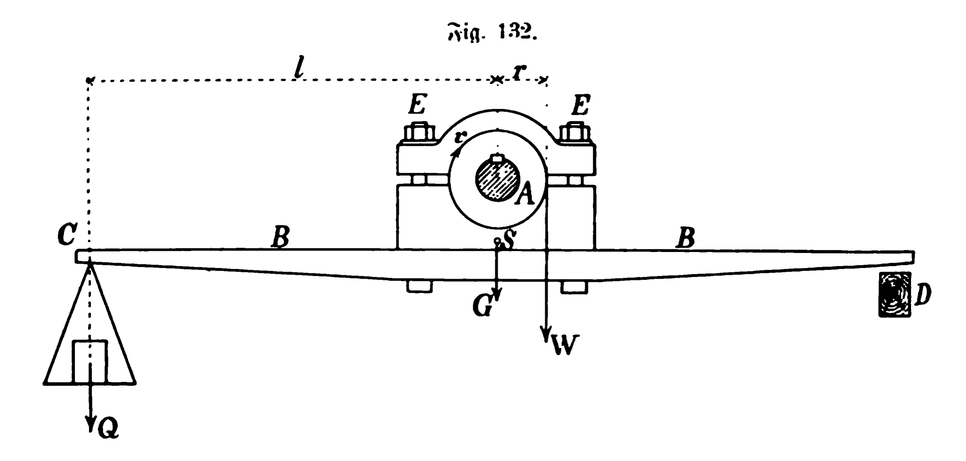
Ist die Stützfläche ein voller Kreis ($r = o$), so wird:

$$\mathfrak{M} = {}^1/_2 fPR \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 102)$$

also nur halb so groß als beim Tragzapfen von demselben Halbmesser, bei welchem der Druck P rechtwinklig zur Achse gerichtet ist.

Die Zapfenreibung kann benutzt werden, um vermittelst einer geeigneten Vorrichtung die Leistung einer Maschine zu messen. Eine solche Vorrichtung, Bremsdynamometer oder Pronyscher Zaum, ist in Fig. 132 dargestellt.

Fig. 132.



Die Welle der Kraftmaschine trägt die fest aufgekeilte Bremsscheibe A, auf welche eine aus zwei kreisförmig ausgeschnittenen Holzbacken bestehende Klemmvorrichtung gesetzt ist. Mit der unteren Backe fest verbunden ist der doppelarmige Hebel B, an dessen einem Ende eine Wagschale zur Aufnahme von Gewichten angebracht ist.*)

Die Anwendung des Zaumes erfordert, daß die Kraftmaschinenwelle zuerst von der Arbeitsmaschine bezw. von der Transmission losgekuppelt wird; darauf wird der Zaum aufgelegt, dessen Schrauben zunächst nur schwach angezogen werden. Wird dann die Kraftmaschine in Gang gesetzt, so entsteht am Umfang der Bremsscheibe eine Reibung, welche den Zaum mit herumzudrehen strebt. Dieses wird jedoch dadurch verhindert, daß sich der Hebel B gegen die Schwelle D legt. Durch allmähliches Anziehen der Schrauben E läßt sich erreichen, daß die Kraftmaschine dieselbe Anzahl Umdrehungen macht als vorher mit angehängter Arbeitsmaschine. Es verzehrt dann die Reibung des Bremszaumes

*) Die ganze Vorrichtung kann auch direkt (ohne Bremsscheibe) auf die Welle gesetzt werden.

dieselbe Arbeit, wie vorher von der Kraftmaschinenwelle an die Arbeitsmaschine abgegeben wurde. Die Wagschale links wird nun so viel belastet, daß der Hebel B sich rechts von der Schwelle D abhebt und wagerecht einspielt. Es ist dann das Moment der Last Q (aufgesetztes Gewicht einschließlich Eigengewicht der Wagschale) gleich dem Momente des am Umfang der Bremsscheibe wirkenden Reibungswiderstandes W; also:

$$W r = Q l \text{ oder } W = Q \frac{l}{r}$$

Ist v die einer bestimmten Umdrehungszahl n entsprechende Umfangsgeschwindigkeit der Bremsscheibe, so ergibt sich nach Gl. 92) der Effekt:

$$E = W v = Q \frac{l}{r} v \quad \ldots\ldots\ldots \quad 103)$$

Setzt man:

$$v = \frac{2 r \pi n}{60}$$

so ist die gesuchte Leistung in Pferdekräften:

$$N = Q l \frac{n \pi}{30 . 75} = 0{,}0014\, Q l n \quad \ldots\ldots \quad 104)$$

Zu bemerken ist noch, daß, indem man die Welle auf verschiedene Umdrehungszahlen bremst, sich ermitteln läßt, bei welcher Umdrehungszahl die Maschine die größte Leistung entwickelt.

3. Rollende Reibung oder Wälzungswiderstand.

Die rollende Reibung tritt auf, wenn ein zylindrischer Körper auf einer Fläche fortrollt. Da kein Stoff vollkommen fest und hart ist, so preßt sich derselbe an der Berührungsstelle zusammen, so daß in Wirklichkeit eine Berührungsfläche von der Breite s entsteht. Um den Körper fortzurollen, bedarf es einer gewissen Kraft; die Zusammenpressung des Stoffes hat also dieselbe Wirkung, als ob ein im Schwerpunkte angreifender Widerstand W_r, welcher der Bewegung entgegenwirkt, zu überwinden wäre (Fig. 133).

Fig. 133.

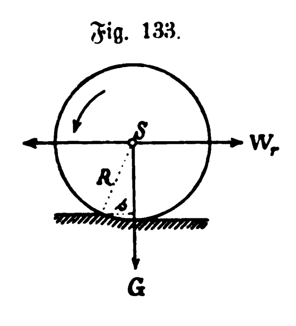
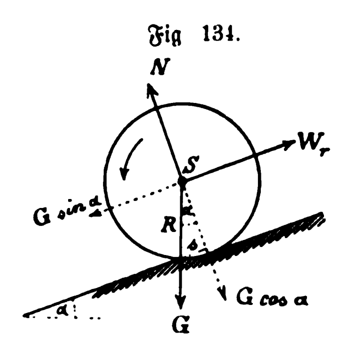


Fig 134.



Ist α derjenige Neigungswinkel einer schiefen Ebene, auf welcher der Körper gleichförmig hinabrollt, so ist nach Fig. 134:

$$W_r = G \sin \alpha = G \frac{s}{R} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 105)$$

Die Größe s kann hiernach aus dem beobachteten Winkel α berechnet werden.

Für Eisen auf Eisen, sowie für Hartholz auf Hartholz ist im Mittel:

$$s = 0{,}05 \text{ cm}$$

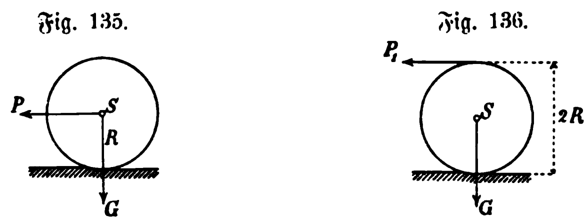
für Holz auf Holz (nicht sehr hart):

$$s = 0{,}1 \text{ cm}$$

für Stein auf Stein (bei gut gepflasterten oder beschotterten Straßen):

$$s = 0{,}15 \text{ cm}$$

Nach Gl. 105) steht der Wälzungswiderstand im geraden Verhältnis zu dem Druck, im umgekehrten Verhältnis zu dem Halbmesser des rollenden Zylinders oder Rades. Je größer daher die Räder eines Fuhrwerks, desto geringer wird die rollende Reibung.



Zum Fortrollen des Zylinders oder Rades ist nach Gl. 105) das Moment erforderlich:

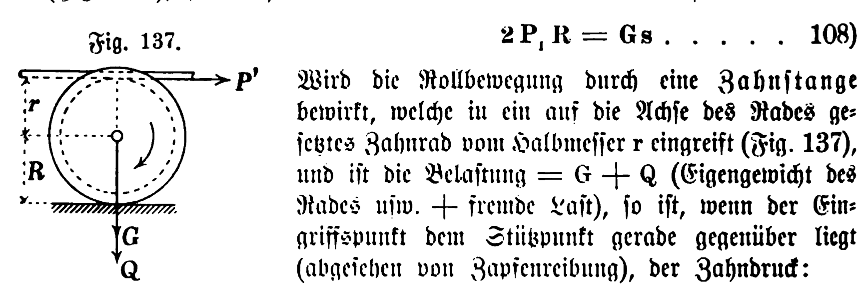
$$\mathfrak{M} = W_r R = G s \quad \ldots\ldots\ldots \quad 106)$$

Wird das Moment $\mathfrak{M}$ erzeugt durch eine im Schwerpunkt S angreifende Kraft P (Fig. 135), so ist auch:

$$P R = G s \quad \ldots\ldots\ldots \quad 107)$$

Greift dagegen eine Kraft P_1 am Umfang, dem Stützpunkt gerade gegenüber an (Fig. 136), so wird, da der Hebelarm der Kraft $= 2R$ ist:

$$2 P_1 R = G s \quad \ldots\ldots \quad 108)$$



Wird die Rollbewegung durch eine Zahnstange bewirkt, welche in ein auf die Achse des Rades gesetztes Zahnrad vom Halbmesser r eingreift (Fig. 137), und ist die Belastung $= G + Q$ (Eigengewicht des Rades usw. + fremde Last), so ist, wenn der Eingriffspunkt dem Stützpunkt gerade gegenüber liegt (abgesehen von Zapfenreibung), der Zahndruck:

$$P' = \frac{(G + Q)s}{R + r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 109)$$

Greift in das auf die Achse gesetzte Zahnrad ein Trieb, so ist zu unterscheiden, ob dessen Drehung von einem festen Punkt aus (Fig. 138) oder von dem fortzubewegenden Wagen aus geschieht (wie z. B. von der Laufwinde eines Laufkranes).

Im ersteren Falle (Fig. 138) gilt, wenn der Eingriffspunkt dem Stützpunkt gegenüber liegt, wieder Gl. 109), während für den letzteren Fall (Fig. 139)

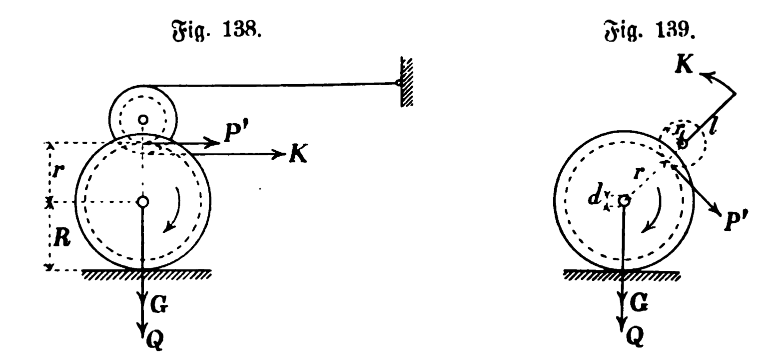


Fig. 138. Fig. 139.

nur das Kraftmoment $P'r$ zur Verfügung steht, so daß man mit Berücksichtigung der Zapfenreibung (Zapfendurchmesser = d) erhält:

$$P'r = (G + Q) \cdot \left(s + f\frac{d}{2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 110)$$

Nach Fig. 139 ist:

$$Kl = P'r_1$$

Also nach Gl. 110):

$$Kl \cdot \frac{r}{r_1} = (G + Q) \cdot \left(s + f\frac{d}{2}\right)$$

Daraus folgt das Übersetzungsverhältnis der Zahnräder:

$$\frac{r}{r_1} = \frac{(G + Q) \cdot \left(s + f\frac{d}{2}\right)}{Kl} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 111)$$

Wird eine Last Q auf zwei Walzen vom Durchmesser d und dem Gewicht G (für eine Walze) fortgerollt (Fig. 140), so ist die dazu erforderliche Kraft:

$$K = \frac{(Q + 2G)s + Qs_1}{d}$$

wobei für s (unten) und s_1 (oben) die dem Materiale entsprechenden Werte einzusetzen sind.

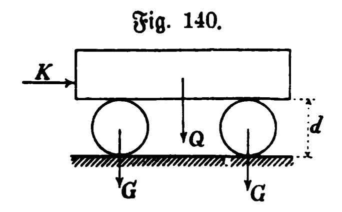


Fig. 140.

Allgemein ist bei einer Anzahl von n Walzen:

$$K = \frac{(Q + nG)s + Qs_1}{d} \quad . \; . \; 112)$$

Meistens wird man das Gewicht der Walzen als verhältnismäßig klein vernachlässigen können und erhält dann:

$$K = \frac{Q(s + s_1)}{d}$$

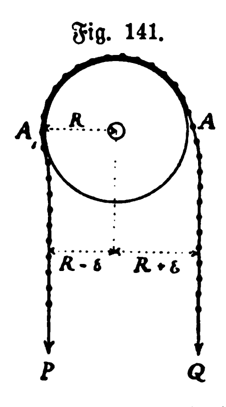
Besteht die Unterlage (die Bahn) aus demselben Material wie die fortzurollende Last, so ist $s = s_1$; folglich:

$$K = \frac{2Qs}{d} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 113)$$

4. Ketten- und Seil-Biegungswiderstand.

Dieser Widerstand tritt auf, wenn eine Kette oder ein Seil auf eine Rolle oder Trommel aufgewickelt oder davon abgewickelt wird. Bei der in Fig. 141 dargestellten Kette entsteht, wenn die Rolle durch die abwärts wirkende Zugkraft P gleichförmig gedreht und die Last Q dabei gehoben wird, an den Stellen A und A_1, wo die Kette aus der geraden in die gekrümmte Form und umgekehrt übergeht, eine Reibung zwischen den einzelnen Kettengliedern. Diese wirkt der Krümmungsänderung der Kette als Widerstand entgegen und hat zur Folge, daß die Kette sich an der Aufwickelungsstelle A nicht sofort genau nach dem Rollenhalbmesser krümmt und an der Abwickelungsstelle A_1 sich nicht sogleich völlig gerade streckt. Dadurch wird der Hebelarm der Last um ein gewisses Maß ε größer, derjenige der Kraft um ebensoviel kleiner als der Rollenhalbmesser R.

Fig. 141.



Aus der Gleichgewichtsbedingung:

$$P(R - \varepsilon) = Q(R + \varepsilon)$$

folgt daher, daß die Kraft P immer größer als die Last Q sein muß.

Die Hebelarme der Kraft und Last werden in ähnlicher Weise auch bei Seilen durch den Biegungswiderstand beeinflußt, welchen die Reibung zwischen den einzelnen Litzen oder Drähten erzeugt.

Man berücksichtigt den Ketten- bezw. Seilbiegungswiderstand am einfachsten dadurch, daß man annimmt, Kraft und Last wirken an demselben Hebelarme R; statt der wirklichen Last Q sei aber eine um den Biegungswiderstand vermehrte Last durch die Kraft P zu heben. Bezeichnet q_1 denjenigen Wert, um welchen die Zugkraft P größer sein muß als diejenige Zugkraft, welche ohne Vor-

handensein des Biegungswiderstandes die Last Q im Gleichgewicht halten könnte, so ist:

$$P = Q + q_1 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 114)$$

Für Ketten ist annähernd:

$$q_1 = f \frac{\delta}{R} Q \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 115)$$

wobei δ den Durchmesser des Ketteneisens, f den Reibungskoeffizient (im Mittel f = 0,25) bedeutet.

Für Seile (Seildurchmesser = δ) hat sich durch Versuche als Mittelwert ergeben:

$$q_1 = 0{,}13 \frac{\delta^2}{R} Q \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 116)$$

Aufgabe 67. Der Schieber einer mit 6 Atmosphären Überdruck (6 kg/qcm) arbeitenden Dampfmaschine (ohne Kondensation) ist 26 cm lang, 25 cm breit. Welche Kraft ist zur Bewegung desselben erforderlich, wenn der Reibungskoeffizient f = 0,1 angenommen wird?

Auflösung. Der gesamte Druck, mit welchem der Schieber auf die Gleitfläche gepreßt wird, ist:

$$N = 6 \,.\, 26 \,.\, 25 = 3900 \text{ kg}$$

Folglich nach Gl. 90) S. 93:

$$W = 0{,}1 \,.\, 3900 = 390 \text{ kg}$$

Aufgabe 68. Wie groß ist die Reibungsarbeit in voriger Aufgabe, wenn der Schieberhub 9 cm beträgt und die Maschine 50 Umdrehungen in der Minute macht?

Auflösung. Während einer Umdrehung der Maschine führt der Schieber einen Vor- und Rückgang aus, legt also den Weg: 2 . 9 = 18 cm zurück. Der Weg in 1 sec oder die Geschwindigkeit ist:

$$v = \frac{50 \,.\, 18}{60} = 15 \text{ cm} = 0{,}15 \text{ m}$$

Daher nach Gl. 92) S. 94:

$$E = 390 \,.\, 0{,}15 = 58{,}5 \text{ mkg}$$

oder Reibungsarbeit in Pferdekräften:

$$N = \frac{58{,}5}{75} = 0{,}78$$

Aufgabe 69. Wie groß ist der Reibungsverlust in der Gleitbahn beim Kurbelmechanismus? (Siehe Fig. 16 S. 21.)

Auflösung. Der Normaldruck V auf die Gleitbahn ist nicht konstant. Allgemein gilt nach Aufg. 27 S. 20:

$$V = P \operatorname{tg} \alpha$$

Für die toten Punkte der Kurbel ($\alpha = o$) ist:

$$V = o$$

für α_{max} ergibt sich:

$$V_{max} = P \operatorname{tg} \alpha_{max}$$

Da es sich hier um verhältnismäßig kleine Winkel handelt, so kann dafür auch gesetzt werden:

$$V_{max} = \sim P \cdot \frac{r}{L}$$

Als Mittelwert während eines Kolbenhubes 2r kann annähernd wohl das arithmetische Mittel aus V = o und V_{max} genommen werden; also:

$$V_m = \sim \frac{1}{2} P \cdot \frac{r}{L} \text{*)}$$

Nach Gl. 90) S. 93:

$$W = f V$$

Zur Überwindung dieser Reibung ist während eines Kolbenhubes eine Arbeit aufzuwenden von:

$$A_1 = W \,.\, 2r = f P \cdot \frac{r^2}{L}$$

Ist P die mittlere Kolbenkraft, so ist die während eines Hubes geleistete Gesamtarbeit der Maschine:

$$A = P \,.\, 2r$$

Daher:

$$\frac{A_1}{A} = \frac{f P \cdot \frac{r^2}{L}}{P \,.\, 2r} = \frac{f}{2} \cdot \frac{r}{L}$$

angenommen z. B.:

$$f = 0{,}06; \quad \frac{r}{L} = \frac{1}{5}$$

Hierfür ergibt sich:

$$\frac{A_1}{A} = \frac{0{,}06}{2 \,.\, 5} = 0{,}006 = \sim 0{,}01$$

d. h.: der Reibungsverlust in der Gleitbahn beträgt ∾ 1% der Gesamtarbeit.

Aufgabe 70. Welche Arbeit geht bei einem Wasserrade durch Zapfenreibung verloren, wenn das Gewicht des Rades samt Wasserfüllung 18000 kg beträgt, der Halbmesser der Zapfen r = 8 cm ist und das Rad n = 8 Umdrehungen in der Minute macht? (f = 0,08.)

Auflösung. Für die Berechnung der Zapfenreibung ist es gleichgültig, wie sich der Druck auf die beiden Zapfen verteilt; man kann daher annehmen, daß ein Zapfen die ganze Last zu tragen hätte.

Nach Gl. 93) S. 94:

$$W = 0{,}08 \,.\, 18000 = 1440 \text{ kg}$$

---

*) Der genauere Wert ist:

$$V_m = \frac{\pi}{4} P \cdot \frac{r}{L}$$

Hierfür würde sich ergeben:

$$A_1 = \frac{\pi}{2} f P \cdot \frac{r^2}{L}$$

$$\frac{A_1}{A} = \frac{\pi f}{4} \cdot \frac{r}{L} = \frac{3{,}14 \,.\, 0{,}06}{4 \,.\, 5} = 0{,}009 = \sim 0{,}01 = 1\%$$

Die Umfangsgeschwindigkeit des Zapfens ist:

$$v = \frac{2 r \pi n}{60} = \frac{2 \,.\, 0{,}08 \,.\, 3{,}14 \,.\, 8}{60} = \backsim 0{,}07 \text{ m}$$

Folglich nach Gl. 96) S. 94 Arbeitsverlust in Pferdekräften:

$$N = \frac{1440 \,.\, 0{,}07}{75} = 1{,}34$$

Aufgabe 71. Ein mit voller Kreisfläche aufruhender Spurzapfen von 12 cm Durchmesser ist in der Achsenrichtung mit P = 7200 kg belastet. Welche Kraft K ist an einem Hebelarme von l = 60 cm Länge erforderlich, um die Zapfenreibung zu überwinden? (f = 0,07.)

Auflösung. Nach Gl. 102) S. 96 ist:

$$\mathfrak{M} = {}^1\!/_2 \,.\, 0{,}07 \,.\, 7200 \,.\, 6 = 1512 \text{ cmkg}$$

Also:

$$K = \frac{\mathfrak{M}}{l} = \frac{1512}{60} = 25{,}2 \text{ kg}$$

Aufgabe 72. Eine Welle wurde vermittelst eines Pronyschen Zaumes so gebremst, daß sie 80 Umdrehungen in der Minute machte. Das Gewicht Q einschließlich Wagschale, um den l = 2 m langen Hebel in wagerechter Lage zu halten, betrug 450 kg. Wieviel Pferdekräfte überträgt die Welle?

Auflösung. Nach Gl. 104) S. 97 ist:

$$N = 0{,}0014 \,.\, 450 \,.\, 2 \,.\, 80 = \backsim 100$$

Aufgabe 73. Bei einem Eisenbahnwagen sei der Radhalbmesser R = 50 cm, der Halbmesser der Achsschenkel (Zapfen) r = 4,5 cm, das Gesamtgewicht des Wagens einschließlich Belastung P = 15 000 kg, das Gewicht der Sätze (Achsen und Räder) p = 2000 kg. Wie groß ist die rollende Reibung; wie groß die Zapfenreibung (bei f = 0,02), und welche Zugkraft Z ist zur Überwindung der Reibungswiderstände erforderlich?

Auflösung. Nach Gl. 105) S. 98 ist die rollende Reibung:

$$W_r = P \frac{s}{R} = 15\,000 \,.\, \frac{0{,}05}{50} = 15 \text{ kg}$$

Auf die Achsschenkel kommt die Last:

$$P - p = 15\,000 - 2000 = 13\,000 \text{ kg}$$

Daher Zapfenreibung nach Gl. 93) S. 94:

$$W = f\,(P - p) = 0{,}02 \,.\, 13\,000 = 260 \text{ kg}$$

oder auf den Umfang der Räder übertragen:

$$W \frac{r}{R} = 260 \,.\, \frac{4{,}5}{50} = 23{,}4 \text{ kg}$$

Die zur Überwindung der Reibungswiderstände erforderliche Zugkraft ist daher:

$$Z = 15 + 23{,}4 = 38{,}4 \text{ kg}$$

oder:

$$\frac{38{,}4}{15\,000} = \backsim \frac{1}{390} \text{ vom Gesamtgewicht des Wagens.}$$

Aufgabe 74. Bei einer Eisenbahnwagen-Drehscheibe von D = 4,3 m Durchmesser soll der Bewegungswiderstand und die zum Drehen erforderliche Kraft ermittelt werden. Gegeben sind folgende Werte:

Gewicht eines beladenen Wagens: $Q = 15000$ kg
Eigengewicht der Drehscheibe: $G = 3000$ kg
Halbmesser der Laufrollen: $r = 20$ cm
Halbmesser der Rollenbahn: $R = 180$ cm

Die Laufrollen seien in einem besonderen Rahmen gelagert, welcher sich frei um den sog. Stuhl, aber unabhängig vom Drehscheibenkörper bewegt, so daß nur rollende Reibung, dagegen keine Zapfenreibung (an den Rollenzapfen) entsteht.

Auflösung. Unter der Annahme, daß die ganze Last von den Laufrollen aufgenommen wird, daß also der Mittelzapfen der Drehscheibe nur zur Zentrierung dient, ist am Umfang der Rollen (dem Stützpunkt diametral gegenüber) nach Gl. 113) S. 100 die Kraft erforderlich:

$$P_1 = \frac{Q + G}{2r} 2s = \frac{18000}{2 \cdot 20} \cdot 2 \cdot 0{,}05 = 45 \text{ kg}$$

Diese Kraft wirkt in der Entfernung $R = 180$ cm vom Mittelpunkt der Drehscheibe und ergibt das Moment:

$$\mathfrak{M} = P_1 R = 45 \cdot 180 = 8100 \text{ cmkg}$$

Eine Kraft P, am Umfang der Drehscheibe wirkend, müßte danach die Größe haben:

$$P = \frac{\mathfrak{M}}{0{,}5 D} = \frac{8100}{0{,}5 \cdot 430} = \backsim 38 \text{ kg}$$

Aufgabe 75. Für eine Lokomotiv-Drehscheibe soll die erforderliche Zahnrad-übersetzung der Drehvorrichtung berechnet werden unter der Voraussetzung, daß von der gesamten Belastung drei Viertel von dem Mittelzapfen und ein Viertel von den fest gelagerten Laufrollen aufgenommen wird.

Gegeben: Durchmesser der Drehscheibe: $D = 13$ m
Gewicht von Lokomotive und Tender: $Q = 70000$ kg
Eigengewicht der Drehscheibe: $G = 17000$ kg
Halbmesser der Laufrollen: $r = 40$ cm
Halbmesser der (größeren) Zapfen der Laufrollen-Achsen: $\varrho = 5$ cm
Halbmesser der Rollenbahn: $R = 600$ cm
Durchmesser des Mittelzapfens: $d = 12$ cm
Zapfenreibungs-Koeffizient: $f = 0{,}1$
Koeffizient der rollenden Reibung: $s = 0{,}05$

Auflösung. Nach der Voraussetzung ist die Belastung der Laufrollen:

$$Q_1 = {}^1/_4 (70000 + 17000) = 21750 \text{ kg}$$

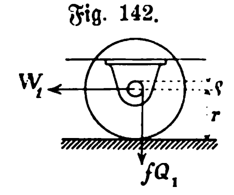
und die Belastung des Mittelzapfens:

$$Q_2 = {}^3/_4 (70000 + 17000) = 65250 \text{ kg}$$

Nach Gl. 94) S. 94 ist das Moment der Zapfenreibung bei den Laufrollen:

$$\mathfrak{M}_1 = f Q_1 \varrho$$

Fig. 142.



Um den Wälzungswiderstand zu überwinden, ist nach Gl. 106) S. 98 das Moment erforderlich:

$$\mathfrak{M}_2 = Q_1 s$$

Eine im Schwerpunkt der Rollen angreifende Kraft W_1 muß danach zur Überwindung des gesamten Rollenwiderstandes die Größe haben (Fig. 142):

$$W_1 = \frac{1}{r}(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) = \frac{Q_1}{r}(f\varrho + s)$$

Das Reibungsmoment des mit Q_2 belasteten Mittelzapfens beträgt nach Gl. 99) S. 95:

$$\mathfrak{M}' = {}^2/_3\, f\, Q_2 \frac{d}{2} = Q_2\, f \frac{d}{3}$$

und ist nach Fig. 143 zu überwinden durch das Moment $W_2 R$; folglich:

$$W_2 = \frac{Q_2}{R} f \frac{d}{3}$$

Fig. 143.

Grundriss

Zur Überwindung sämtlicher Reibungswiderstände ist daher eine am Halbmesser R und im Schwerpunkt der Rollen angreifende Kraft erforderlich von der Größe:

$$W = W_1 + W_2 = \frac{Q_1}{r}(f\varrho + s) + \frac{Q_2}{R} f \frac{d}{3}$$

Für die gegebenen Zahlenwerte ergibt sich:

$$W = \frac{21\,750}{40}(0{,}1 \,.\, 5 + 0{,}05) + \frac{65\,250}{600} \,.\, 0{,}1 \,.\, \frac{12}{3} = 343 \text{ kg}$$

Diese Kraft soll ausgeübt werden mit Hilfe eines auf die Rollenachse aufgekeilten Zahnrades vom Halbmesser $r_1 = 36$ cm, welches den Abstand $R_1 = 580$ cm von der Drehscheibenmitte hat. Ist P der Zahndruck, so ist das erforderliche Moment:

$$P r_1 \cong W r \,.\, \frac{R}{R_1} = 343 \,.\, 40 \,.\, \frac{600}{580} = 14184$$

Nimmt man an den Handkurbeln 4 Arbeiter an, von denen jeder eine Kraft $K = 16$ kg ausübt, so ist bei $l = 40$ cm Kurbelradius das Kraftmoment:

$$K\, l = 4 \,.\, 16 \,.\, 40 = 2560$$

Das Lastmoment ist:

$$P\, r_1 = 14\,184$$

Folglich das Übersetzungsverhältnis:

$$i = \frac{P\, r_1}{K\, l} = \frac{14\,184}{2560} = 5{,}54$$

Es mag noch erwähnt werden, daß zu dem angegebenen Bewegungswiderstande noch andere (z. B. Zahnreibung usw.) hinzutreten, und daß aus diesem Grunde und auch mit Rücksicht auf etwaige Unvollkommenheiten in der Ausführung die Übersetzung praktisch etwas größer als die oben berechnete genommen wird ($i = \sim 6$).

Aufgabe 76. An einem über eine feste Rolle geführten Seile hängt die Last Q; am anderen Ende greift die senkrecht abwärts wirkende Kraft P an. Wenn die Seildicke $\delta = 3$ cm, der Durchmesser des Rollenzapfens $d = 3$ cm und der Rollenhalbmesser $R = 12$ cm ist, wie groß muß dann P im Verhältnis zu Q sein?

Auflösung. Nach Gl. 116) S. 101 ist der Seilbiegungswiderstand:

$$q_1 = 0{,}13 \cdot \frac{3^2}{12} \cdot Q = 0{,}098 \,.\, Q$$

Auf die Zapfen kommt die Last $P + Q$, wofür genügend genau $2\,Q$ gesetzt werden kann. Danach ist die Reibung am Umfange des Rollenzapfens ($f = 0{,}08$):

$$W = 0{,}08 \,.\, 2\,Q = 0{,}16 \,.\, Q$$

oder auf den Rollenumfang übertragen:

$$q_2 = W \cdot \frac{1/2\, d}{R} = 0{,}16\, Q \cdot \frac{1{,}5}{12} = 0{,}02\, Q$$

Da nun die Zugkraft P um den Betrag der Widerstände größer sein muß als die Last Q, um diese im Gleichgewichte zu halten, so ist:

$$P = Q + q_1 + q_2 = Q\,(1 + 0{,}098 + 0{,}02) = 1{,}118\,.\,Q$$

Die Zahl, mit welcher die Last zu multiplizieren ist, um die Größe der erforderlichen Zugkraft zu erhalten, wird der Widerstandskoeffizient genannt und mit μ bezeichnet. Der umgekehrte (reziproke) Wert von μ ist der Wirkungsgrad η. Allgemein ist danach bei einer festen Rolle:

$$P = \mu Q = \frac{Q}{\eta} \quad \ldots\ldots\ldots\ 117)$$

Für Hanfseile ist im Mittel:

$$\mu = 1{,}12;\ \eta = \frac{1}{1{,}12} = 0{,}89 \quad \ldots\ldots\ 118)$$

Für Ketten ist im Mittel:

$$\mu = 1{,}05;\ \eta = \frac{1}{1{,}05} = 0{,}95 \quad \ldots\ldots\ 119)$$

§ 16.

Die einfachen Maschinen mit Berücksichtigung der Reibung.

1. Der Hebel.

Für den zweiarmigen Hebel (Fig. 99.) S. 71 ergibt sich für die zum gleichförmigen Heben der Last Q erforderliche Kraft P, wenn der Halbmesser des Drehzapfens mit ϱ bezeichnet wird, die Gleichgewichtsbedingung:

$$P r = Q l + G a + (P + G + Q) f \varrho$$

Also:

$$P = \frac{Q l + G a + (G + Q) f \varrho}{r - f \varrho} \quad \ldots\ldots\ 120)$$

In gleicher Weise erhält man für die Kraft P_1, welche ein Sinken der Last Q verhindert:

$$P_1 = \frac{Q l + G a - (G + Q) f \varrho}{r + f \varrho} \quad \ldots\ldots\ 121)$$

2. Das Wellrad. (Fig. 110 S. 78.)

Die Kraft P (welche, wenn z. B. das Rad vom Halbmesser R ein Zahnrad ist, in dem Zahndrucke besteht) hat beim Heben der Last Q den

Zapfenreibungs- und Seilbiegungswiderstand zu überwinden. Da hier nur ein Aufwickeln des Seiles auf die Welle oder die auf der Welle befestigte Trommel, aber kein Abwickeln stattfindet, so ist für den Seilbiegungswiderstand nur die Hälfte des in Gl. 116) S. 101 angegebenen Wertes in Rechnung zu stellen. Ist G das Eigengewicht des Rades, δ die Seildicke, ϱ der Zapfenhalbmesser, so lautet für den Fall, daß $P \parallel Q$ ist, die Gleichgewichtsbedingung:

$$PR = Qw + (P + G + Q) f\varrho + \tfrac{1}{2}\left(0{,}13\,\frac{\delta^2}{w}\,Q\right) w$$

oder:

$$P = \frac{Qw + (G + Q) f\varrho + \tfrac{1}{2} \cdot 0{,}13\,\delta^2 Q}{R - f\varrho} \quad . \; . \; . \quad 122)$$

Die Kraft P_1, welche ein Sinken der Last verhindert, ergibt sich:

$$P_1 = \frac{Qw - (G + Q) f\varrho - \tfrac{1}{2} \cdot 0{,}13\,\delta^2 Q}{R + f\varrho} \quad . \; . \; . \quad 123)$$

3. Die Rolle.

a) Feste Rolle. Wird in Fig. 141 S. 100 der Durchmesser des Rollenzapfens mit d bezeichnet, so ist die Zapfenreibung:

$$W = f(P + Q) = \sim f \,.\, 2\,Q$$

Die Gleichgewichtsbedingung für gleichförmiges Heben der Last Q ist:

$$P \,.\, R = f \,.\, 2Q \,.\, \frac{d}{2} + (Q + q_1) \,.\, R$$

Daraus folgt die erforderliche Zugkraft:

$$P = \frac{f \,.\, Q \,.\, d + (Q + q_1) \,.\, R}{R} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 124)$$

oder allgemein nach Gl. 117) S. 106:

$$P = \mu Q = \frac{Q}{\eta}$$

Bei Hanfseilrollen ist der Wirkungsgrad oder das Güteverhältnis abhängig vom Seildurchmesser δ. Wird in Gl. 124) der Wert für q_1 aus Gl. 116) S. 101 eingesetzt, so ergibt sich:

$$\eta = \frac{Q}{P} = \frac{1}{1 + f \cdot \dfrac{d}{R} + 0{,}13 \cdot \dfrac{\delta}{R} \cdot \delta}$$

Wenn die für Hanfseilrollen gebräuchlichen Mittelwerte:

$$R = 4\,\delta;\; d = 0{,}8\,\delta;\; R = 5\,d$$

angenommen werden, so folgt für $f = 0{,}08$ aus obiger Gleichung:

$$\eta = \frac{1}{1{,}016 + 0{,}0825\,\delta} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 125)$$

Daraus berechnen sich für die angeführten Seildurchmesser folgende Werte:

für $\delta = 1{,}6$ cm : $\eta = 0{,}936$
„ „ $= 2{,}6$ „ : „ $= 0{,}909$
„ „ $= 3{,}6$ „ : „ $= 0{,}883$
„ „ $= 4{,}6$ „ : „ $= 0{,}858$
„ „ $= 5{,}2$ „ : „ $= 0{,}844$

Als Mittelwert ergibt sich hieraus: $\eta = 0{,}886 = \sim \mathbf{0{,}89}$ (wie schon in Gl. 118) S. 106 angegeben).

Werden für Kettenrollen die gebräuchlichen Mittelwerte:

$$R = 10\delta;\ d = 3\delta;\ R = \frac{10}{3} d$$

angenommen, so folgt aus Gl. 124) und Gl. 115):

$$\eta = \frac{Q}{P} = \frac{1}{1 + 0{,}08\ .\ 0{,}3 + 0{,}25\ .\ 0{,}1} = \sim \mathbf{0{,}95}$$

(wie schon in Gl. 119) S. 106 angegeben.)

Der Wirkungsgrad bei Drahtseilrollen ist etwa derselbe wie bei Kettenrollen.

b) Lose Rolle (Fig 113 S. 81). Die am freien Seilende angreifende Kraft P muß nach Gl. 117) μ mal größer sein als die Spannkraft des festen (linken) Seilendes; letztere ist daher $= \frac{P}{\mu}$. Aus der Gleichgewichtsbedingung:

$$P + \frac{P}{\mu} = Q$$

folgt dann:

$$\mathbf{P = \frac{Q}{1 + \frac{1}{\mu}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \mathbf{125)}$$

Sind nach Fig. 113 v und c die Geschwindigkeiten von Kraft und Last, so ergibt sich hier der Wirkungsgrad oder das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{Q\ .\ c}{P\ .\ v}$$

Da nach Gl. 73) S. 82 $c = \frac{v}{2}$, so wird:

$$\eta = \frac{1 + \frac{1}{\mu}}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \mathbf{126)}$$

Der Wert $\frac{1}{\mu}$ ist aber nichts anderes als das Güteverhältnis der festen Rolle. Nach Gl. 126) ergibt sich dann im Mittel:

für Hanfseile: $\eta = \frac{1 + 0{,}89}{2} = \mathbf{0{,}945}$

$$\text{für Ketten: } \eta = \frac{1 + 0{,}95}{2} = 0{,}975$$

Die Wirkungsgrade der losen Rolle sind also größer als diejenigen der festen Rolle.

In gleicher Weise ergeben sich für Hanfseile die genaueren Werte:

für $\delta = 1{,}6$ cm : $\eta = 0{,}968$
„ „ $= 2{,}6$ „ : „ $= 0{,}954$
„ „ $= 3{,}6$ „ : „ $= 0{,}941$
„ „ $= 4{,}6$ „ : „ $= 0{,}929$
„ „ $= 5{,}2$ „ : „ $= 0{,}922$

c) Feste und lose Rolle (Fig. 114 S. 81). Die in Frage kommenden Seilspannungen sind hier: $\frac{P}{\mu}$ und $\frac{P}{\mu^2}$. Die Gleichgewichtsbedingung für die untere, lose Rolle ist daher:

$$\frac{P}{\mu} + \frac{P}{\mu^2} = Q$$

oder:

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{\mu}\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)}$$

Für einen Potenzenzug mit n losen und einer festen Rolle (Fig. 115 S. 82) gilt dann allgemein:

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{\mu}\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)^n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 127)$$

Ohne Berücksichtigung der Widerstände ist nach Gl. 74) S. 82:

$$P = \frac{Q}{2^n}$$

Das Güteverhältnis ergibt sich daher auch als:

$$\eta = \frac{P \text{ ohne Widerstand}}{P \text{ mit Widerstand}} = \frac{\frac{1}{\mu}\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)^n}{2^n}$$

Wird das Güteverhältnis der festen Rolle: $\frac{1}{\mu}$ mit η_1 bezeichnet und dasjenige der losen Rolle: $\frac{1 + \frac{1}{\mu}}{2}$ mit η_2, so ist der Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2^{\,n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 128)$$

Unter Zugrundelegung der Mittelwerte $\eta_1 = 0{,}89$ und $\eta_2 = \backsim 0{,}95$ berechnen sich nach Gl. 128) für Hanfseile folgende Mittelwerte für das Güteverhältnis η des Potenzenzuges:

für 1 lose Rolle : $\eta = 0{,}845$
„ 2 „ Rollen: „ $= 0{,}801$
„ 3 „ „ : „ $= 0{,}763$
„ 4 „ „ : „ $= 0{,}721$

Die genaueren Werte von η für die verschiedenen Seildurchmesser δ ergeben sich z. B. wie folgt:

Für $\delta = 1{,}6$ cm und $n = 3$ lose Rollen ist:

nach S. 108: $\eta_1 = 0{,}936$; nach S. 109: $\eta_2 = 0{,}968$

also nach Gl. 128):

$$\eta = 0{,}936 \,.\, 0{,}968^3 = 0{,}936 \,.\, 0{,}907 = \mathbf{0{,}849}$$

Für $\delta = 5{,}2$ cm und $n = 3$ lose Rollen ist:

nach S. 108: $\eta_1 = 0{,}844$; nach S. 109: $\eta_2 = 0{,}922$

also nach Gl. 128):

$$\eta = 0{,}844 \,.\, 0{,}922^3 = 0{,}844 \,.\, 0{,}784 = \mathbf{0{,}662}$$

d) Bei dem gewöhnlichen Flaschenzuge (Fig. 116 S. 83) sind die in den Seilen 1, 2, 3, 4 auftretenden Spannkräfte: $\frac{P}{\mu}, \frac{P}{\mu^2}, \frac{P}{\mu^3}, \frac{P}{\mu^4}$. Also:

$$P\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu^2} + \frac{1}{\mu^3} + \frac{1}{\mu^4}\right) = Q$$

oder:

$$P\,\frac{1}{\mu^4}\left(1 + \mu + \mu^2 + \mu^3\right) = Q$$

Setzt man:

$$1 + \mu + \mu^2 + \mu^3 = s$$

so wird:

$$\mu + \mu^2 + \mu^3 + \mu^4 = \mu s$$

Durch Subtraktion der oberen Gleichung von der unteren erhält man:

$$\mu^4 - 1 = (\mu - 1)\, s$$

oder:

$$s = \frac{\mu^4 - 1}{\mu - 1}$$

Nach Einsetzung dieses Wertes für die Reihe $1 + \mu + \mu^2 + \mu^3$ ergibt sich dann:

$$P\,\frac{1}{\mu^4}\left(\frac{\mu^4 - 1}{\mu - 1}\right) = Q$$

folglich:

$$P = Q\,\frac{\mu^5 - \mu^4}{\mu^4 - 1}$$

Allgemein ist für n lose Rollen:

$$P = Q \frac{\mu^{2n+1} - \mu^{2n}}{\mu^{2n} - 1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 129)$$

Da nach Gl. 76) S. 83 ohne Berücksichtigung der Widerstände:

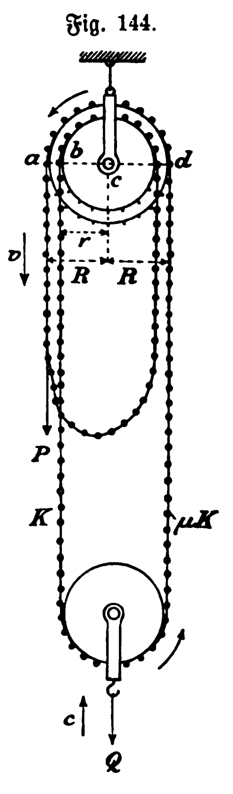
$$P = \frac{Q}{2n}$$

so folgt für das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{\mu^{2n} - 1}{2n\,(\mu^{2n+1} - \mu^{2n})} = \frac{1}{2n\,\mu^{2n}} \cdot \frac{\mu^{2n} - 1}{\mu - 1} \quad . \; . \quad 130)$$

Unter Zugrundelegung der Mittelwerte $\mu = 1{,}12$ für Seile und $\mu = 1{,}05$ für Ketten ist nach Gl. 130) folgende Tabelle berechnet:

Anzahl der losen Rollen	für Hanfseile $\eta =$	für Ketten $\eta =$
n = 1	0,844	0,927
„ = 2	0,759	0,880
„ = 3	0,685	0,848
„ = 4	0,620	0,805



Die genaueren Werte für η, entsprechend den Seildurchmessern δ, würden sich folgendermaßen ergeben:

Z. B. für $\delta = 3{,}6$ cm ist nach S. 108:

$$\mu = \frac{1}{0{,}883} = 1{,}13$$

Für einen Flaschenzug mit n = 3 losen Rollen ergibt sich dann nach Gl. 130) der genauere Wert:

$$\eta = \frac{1}{6 \cdot 1{,}13^6} \cdot \frac{1{,}13^6 - 1}{1{,}13 - 1} = 0{,}666$$

e) Bei dem Differentialflaschenzuge (Fig. 144) ist die Gleichgewichtsbedingung für die untere Rolle:

$$K + \mu K = Q$$

woraus folgt:

$$K = \frac{Q}{1 + \mu}$$

Für die oberen Rollen ist das Moment der Kraft $= PR + Kr$; das Moment der Last $= \mu KR$.

Da nun das Moment der Kraft μmal so groß sein muß als das Moment der Last, so ist:

$$PR + Kr = \mu (\mu KR)$$

oder:

$$P = K \cdot \frac{\mu^2 R - r}{R} = K \left(\mu^2 - \frac{r}{R}\right)$$

und wenn man für K den oben gefundenen Wert einsetzt:

$$P = Q \frac{\mu^2 - \frac{r}{R}}{1 + \mu} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 131)$$

Ohne Berücksichtigung der Reibungswiderstände war nach Gl. 78) S. 84:

$$P = \frac{Q}{2}\left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

folglich ist das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{(1 + \mu)\left(1 - \frac{r}{R}\right)}{2\left(\mu^2 - \frac{r}{R}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 132)$$

Für $\mu = 1{,}05$ und $\frac{r}{R} = \frac{11}{12}$ wird: $\eta = \infty\ 0{,}46$.

4. Die schiefe Ebene.

Wird ein Körper auf einer schiefen Ebene durch eine der Bahn parallel gerichtete Kraft P gleichförmig bergan gezogen (Fig. 145), so hat diese Kraft außer der bergab wirkenden Seitenkraft $G \sin \alpha$ des Körpergewichtes G noch die Reibung:

$$W = fN = fG \cos \alpha$$

als Widerstand zu überwinden. Man erhält daher:

$$P = G \sin \alpha + fG \cos \alpha \, ^{*)}$$

oder, indem man nach Gl. 91) S. 93 für f den Wert $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$ einsetzt:

$$P = G\left(\sin \alpha + \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \cos \alpha\right)$$

---

*) Die obige Gleichung:

$$P = G \sin \alpha + fG \cos \alpha$$

läßt sich auch in der Form schreiben:

$$P = G \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha + f)$$

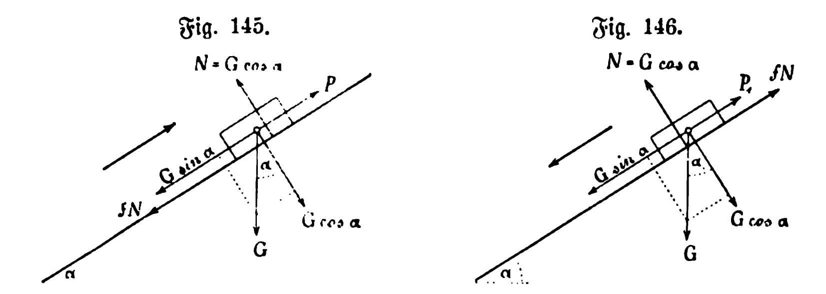
wofür bei sehr kleinem Winkel α genügend genau gesetzt werden kann:

$$P = G (\operatorname{tg} \alpha + f)$$

$$P = G\left(\frac{\sin\alpha\cos\varphi + \cos\alpha\sin\varphi}{\cos\varphi}\right)$$

$$P = G\frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos\varphi}$$

Fig. 145. Fig. 146.



Führt der Körper eine gleichförmige Abwärtsbewegung aus, so wirkt der Reibungswiderstand in der Richtung der Kraft P_1 (Fig. 146); folglich ist:

$$P_1 = G\sin\alpha - fG\cos\alpha$$

oder:

$$P_1 = G\frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos\varphi}$$

Wirkt die Kraft P wagerecht (Fig. 147), so erhält man als Bedingung der gleichförmigen Aufwärtsbewegung:

$$P\cos\alpha = G\sin\alpha + fN = G\sin\alpha + f(P\sin\alpha + G\cos\alpha)$$

oder:

$$P = G\frac{\sin\alpha + f\cos\alpha}{\cos\alpha - f\sin\alpha}$$

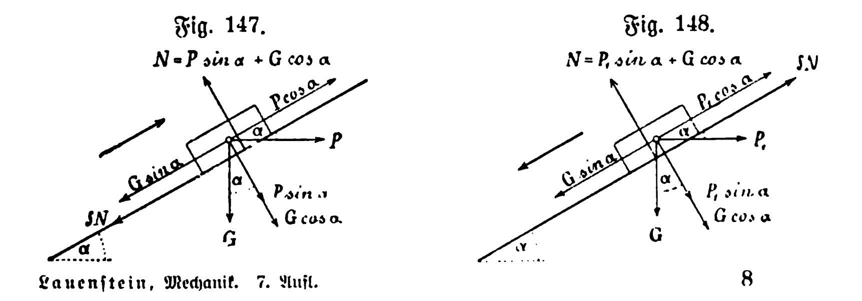
Dividiert man Zähler und Nenner durch $\cos\alpha$ und setzt wieder $f = \operatorname{tg}\varphi$, so ergibt sich:

$$P = G\frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\varphi}{1 - \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\varphi}$$

oder:

$$P = G\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 133)$$

Fig. 147. Fig. 148.



In gleicher Weise erhält man für die gleichförmige **Abwärtsbewegung** (Fig. 148):

$$P_1 = G \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 134)$$

Durch eine Kraft, welche größer als P_1, aber kleiner als P ist, würde ein Körper auf der schiefen Ebene weder aufwärts noch abwärts in Bewegung gesetzt werden.

5. Die Schraube.

Da die Schraube nach 5. § 14 S. 88 als eine um einen Zylinder gewundene schiefe Ebene betrachtet werden kann, so sind die Gleichungen 133) und 134) auch unmittelbar als Gleichgewichtsbedingungen für eine **flachgängige** Schraube gültig, wenn die zu überwindende Last Q statt G eingesetzt wird. Also:

$$P = Q \operatorname{tg}(\alpha \pm \varphi) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 135)$$

Multipliziert man beide Seiten dieser Gleichung mit dem mittleren Schraubenhalbmesser ϱ und ersetzt das Moment $P\varrho$ durch ein gleichwertiges Moment Kl, so erhält man:

$$Kl = Q\varrho \operatorname{tg}(\alpha \pm \varphi) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 136)$$

Das Zeichen + gilt, wenn der zu überwindende Widerstand Q der gleichförmig fortschreitenden Bewegung der Schraube **entgegengesetzt** gerichtet ist; das Zeichen — für den **umgekehrten** Fall, wo die fortschreitende Bewegung der Schraube in der Richtung von Q erfolgt.

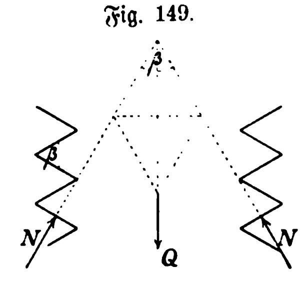
Nach Gl. 85) S. 89 war ohne Berücksichtigung der Reibung:

$$Kl = Q\varrho \operatorname{tg} \alpha$$

Folglich ist das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \quad \ldots\ldots \quad 137)$$

Fig. 149.



Bei der **scharfgängigen** Schraube (Fig. 149) erzeugt die Last Q an den unteren Flächen der Schraubengänge normal zu diesen gerichtete Gegendrücke, die sich gleichmäßig über den ganzen Umfang verteilen. Die Mittelkraft der auf einen halben Schraubengang kommenden Gegendrücke sei N; es liegen dann die (den zwei sich aneinander anschließenden halben Schraubengängen entsprechenden) Kräfte N und die Kraft Q in einer Ebene und halten einander im Gleichgewicht. Wird der Winkel an den Gewindespitzen mit β bezeichnet, so ist, da die Kräfte N denselben Winkel β miteinander einschließen, nach Fig. 149:

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{\frac{1}{2} Q}{N}$$

oder:

$$N = \frac{Q}{2 \cos {}^{\beta}/_2}$$

Bei der Bewegung der Schraube ist der Reibungswiderstand zu überwinden:

$$W = 2fN = \frac{fQ}{\cos {}^{\beta}/_2}$$

und wenn man setzt:

$$\frac{f}{\cos {}^{\beta}/_2} = f_1 = tg\,\psi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 138)$$

so wird:

$$W = f_1 Q = Q\,tg\,\psi$$

Bei der flachgängigen Schraube, bei welcher die Gegendrücke N parallel zu Q gerichtet sind, ist:

$$W = fQ = Q\,tg\,\varphi$$

Man kann daher die für die flachgängige Schraube geltende Gl. 136) unmittelbar für die scharfgängige Schraube benutzen, wenn man darin $tg\,\varphi$ mit dem größeren Werte $tg\,\psi$ vertauscht. Man erhält dann:

$$K\,l = Q\,\varrho\,tg\,(\alpha \pm \psi) = Q\,\varrho\,\frac{tg\,\alpha \pm tg\,\psi}{1 \mp tg\,\alpha\,tg\,\psi}$$

Für die Whitworthschen Schrauben ist $\beta = 55^0$; also:

$$\cos {}^{\beta}/_2 = \cos 27^1/_2{}^0 = 0{,}887$$

Folglich nach Gl. 138):

$$tg\,\psi = \frac{f}{0{,}887} = 1{,}13\,f = 1{,}13\,tg\,\varphi$$

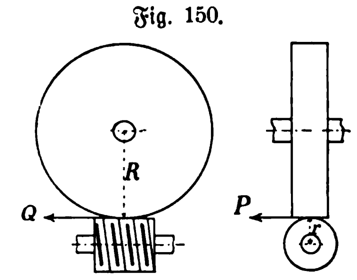
Nach Einsetzung dieses Wertes erhält man für die scharfgängige Schraube:

$$K\,l = Q\,\varrho\,\frac{tg\,\alpha \pm 1{,}13\,tg\,\varphi}{1 \mp 1{,}13\,tg\,\alpha\,tg\,\varphi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 139)$$

Bei der scharfgängigen Schraube ist die Reibung viel bedeutender als bei der flachgängigen; sie findet daher als Bewegungsvorrichtung wenig Anwendung.

Das z. B. als Aufzugsvorrichtung vielfach angewandte Schneckengetriebe (Schnecke und Schneckenrad; Schraube und Schraubenrad oder Schraube ohne Ende) läßt sich unmittelbar auf die Schraube zurückführen.

Fig. 150.



Denkt man sich aus der (genügend lang angenommenen) Mutter einer Schraube einen Streifen parallel der Achse herausgeschnitten

und mit der glatten Seite (also mit den Schraubengängen nach außen) um eine zylindrische Scheibe gewickelt, so entsteht dadurch ein Schneckenrad (Fig. 150).

Werden Schnecke und Schneckenrad mit einer der für Zahnrad und Zahnstange üblichen Verzahnungen ausgeführt (die Schnecke erhält das Profil der Zahnstange), so erscheint das bei der eingängigen Schraube als Steigung (Ganghöhe) bezeichnete Maß (vergl. S. 88) hier als Teilung t.

Ohne Berücksichtigung der Reibungswiderstände ist nach Gl. 84) S. 89:

$$P_0 = Q \operatorname{tg} \alpha$$

oder nach Fig. 151:

Fig. 151.

$$P_0 = Q \frac{t}{2 r \pi}$$

oder indem man Zähler und Nenner mit R multipliziert:

$$P_0 = Q \frac{t R}{2 r \pi R} = \frac{Q R}{r} \cdot \frac{t}{2 R \pi}$$

Da aber: $\frac{2 R \pi}{t}$ $\left(\text{d. h. } \frac{\text{Umfang}}{\text{Teilung}}\right)$ = der Zähnezahl z des Rades ist, so folgt:

$$z = \frac{Q R}{P_0 r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 140)$$

Mit Berücksichtigung der Reibungswiderstände ist nach Gl. 135) S. 114:

$$P = Q \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)$$

Das Güteverhältnis η ergibt sich dann:

$$\eta = \frac{P_0}{P} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} (\alpha + \varphi)} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 141)$$

Setzt man in Gl. 140) für P_0 den (sich aus Gl. 141) ergebenden) Wert ηP ein, so erhält man für die praktisch auszuführende Zähnezahl des Schneckenrades:

$$z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{Q R}{P r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 142)$$

Die Gleichung 141) läßt sich auch schreiben:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha (1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi)}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi}$$

oder für $\operatorname{tg} \varphi = f$:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha (1 - f \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha + f}$$

Wird der mittlere Halbmesser r der eingängigen Schnecke etwa angenommen zu:

$$r = 1{,}6\, t$$

so folgt:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{t}{2 r \pi} = \frac{1}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 3{,}14} = 0{,}1$$

Die Größe des Reibungskoeffizienten f ist abhängig von der Ausführung des Getriebes (bearbeitete oder unbearbeitete Zähne) und vor allem von der Schmierung desselben.

Bei im Freien stehenden Apparaten (wie z. B. bei Schützenaufzügen), die nicht ununterbrochen und sorgfältig geschmiert werden, ist f verhältnismäßig hoch anzunehmen. Man kann hier setzen $f = 0{,}16$.

Für diese Zahlenwerte ($\mathrm{tg}\,\alpha = 0{,}1$ und $f = 0{,}16$) wird dann das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{0{,}1\,(1 - 0{,}16 \,.\, 0{,}1)}{0{,}1 + 0{,}16} = 0{,}38$$

Wird außerdem die an den Lagern noch auftretende Reibung (hauptsächlich verursacht durch den Druck in der Achsenrichtung der Schnecke) berücksichtigt, so kann der Gesamtwirkungsgrad des ganzen Getriebes etwa angenommen werden zu:

$$\eta = \sim 0{,}25$$

Soll ein als Aufzugsvorrichtung verwendetes Schneckengetriebe die Eigenschaft der Selbsthemmung besitzen; d. h.: soll ein Niedersinken der gehobenen Last durch die Widerstände allein verhindert werden, so muß nach Gl. 135) S. 114 sein:

$$0 = Q\,\mathrm{tg}\,(\alpha - \varphi)$$

also auch:

$$\mathrm{tg}\,\alpha \leqq \mathrm{tg}\,\varphi \leqq f.$$

Wird für normale Verhältnisse $f = 0{,}1$ angenommen, so folgt:

$$\mathrm{tg}\,\alpha \leqq \frac{1}{10}$$

oder Steigungswinkel der eingängigen Schnecke:

$$\alpha < 5^0\,40' \leqq \sim 6^0$$

Aus $\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{t}{2\,r\,\pi} \leqq \frac{1}{10}$ ergibt sich als Bedingung für Selbsthemmung auch:

$$r \geqq \frac{10}{2\pi} \,.\, t \geqq 1{,}6\,t.$$

Bei n-gängigen (d. h. mehrgängigen) Schrauben ist:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{n\,t}{2\,r\,\pi}$$

Danach ergibt sich in derselben Weise wie bei der eingängigen Schraube die Zähnezahl des Rades zu:

$$z = \frac{n}{\eta} \,.\, \frac{Q\,R}{P\,r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 143)$$

Das Güteverhältnis η (Gl. 141) ist hier bedeutend größer als bei der eingängigen Schraube; teils wegen des größeren Steigungswinkels α; teils

weil bei Anwendung von mehrgängigen Schrauben die Schmierung in der Regel sehr sorgfältig ist und daher der Reibungskoeffizient $f = tg\,\varphi$ bedeutend kleiner als 0,1 angenommen werden kann.

Z. B. für $\alpha = 20^0$ und $f = \sim 0{,}05$, entsprechend $\varphi = \sim 3^0$, ergibt sich nach Gl. 141) das Güteverhältnis (ohne Lagerreibung):

$$\eta = \frac{tg\,20^0}{tg\,23^0} = \frac{0{,}364}{0{,}424} = \sim 0{,}86$$

Bei Schneckengetrieben, welche z. T. in Öl laufen (wie z. B. bei elektrischen Antrieben) kann unter Umständen f bis auf 0,01 herabgehen.

6. Der Keil.

Ohne Berücksichtigung der Reibung ist für $Q \perp AC$ bezw. BC nach Gl. 87) S. 91:

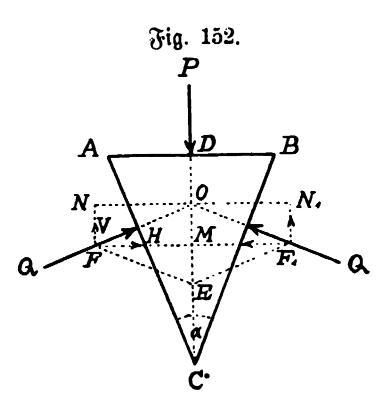
$$P = 2\,Q \sin\frac{\alpha}{2}$$

Beim Antreiben des Keils tritt nun aber an beiden Seiten ein Reibungswiderstand fQ auf (Fig. 152), welcher der Bewegung entgegengesetzt gerichtet ist. Die Mittelkraft aus Q und fQ weicht um den Reibungswinkel φ von der Normalen zu AC bezw. BC ab.

Man erhält daher die zum Eintreiben des Keiles erforderliche Kraft P, wenn man in Gl. 87) statt $\frac{\alpha}{2}$ den Wert $\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right)$ einsetzt. Danach ist mit Berücksichtigung der Reibung:

$$P = 2\,Q \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right) \quad . \quad . \quad . \quad 144)$$

Fig. 152.



Nach Aufhören der Kraft P hat der Keil das Bestreben zurückzugehen. Dann wirkt die Reibung nach entgegengesetzter Richtung, und es ergibt sich die Kraft P_1, welche erforderlich ist, um ein Zurückgehen des Keiles zu verhindern, zu:

$$P_1 = 2\,Q \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \varphi\right) \quad . \quad . \quad . \quad 145)$$

Für $\varphi > \frac{\alpha}{2}$ wird P_1 negativ; d. h. der Keil wird nicht selbsttätig zurückgehen, und es bedarf einer Kraft:

$$P_2 = -P_1 = 2\,Q \sin\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 146)$$

entgegengesetzt der Kraft P, um den Keil loszutreiben.

Aufgabe 77. Bei dem in Aufgabe 49 S. 76 angegebenen Hebel sei der Zapfenhalbmesser $\varrho = 0{,}6$ cm. Gesucht: P und P_1 mit Berücksichtigung der Zapfenreibung ($f = 0{,}1$).

Auflösung. Nach Gl. 120) S. 106:

$$P = \frac{20 \cdot 100 + 6 \cdot 10 + (6 + 20) \cdot 0{,}1 \cdot 06}{40 - 0{,}1 \cdot 0{,}6} = 51{,}62 \text{ kg}$$

Nach Gl. 121):

$$P_1 = \frac{20 \cdot 100 + 6 \cdot 10 - (6 + 20) \cdot 0{,}1 \cdot 06}{40 + 0{,}1 \cdot 0{,}6} = 51{,}38 \text{ kg}$$

Aufgabe 78. Wie groß ist P und P_1 bei dem in Aufgabe 50 S. 76 angegebenen einarmigen Hebel, wenn $\varrho = 1$ cm und $f = 0{,}1$ angenommen wird?

Auflösung. Es ergibt sich hier:

$$P = \frac{200 \cdot 12 - 5 \cdot 32 + (5 + 200) \cdot 0{,}1 \cdot 1}{80 - 0{,}1 \cdot 1} = 28{,}29 \text{ kg}$$

$$P_1 = \frac{200 \cdot 12 - 5 \cdot 32 - (5 + 200) \cdot 0{,}1 \cdot 1}{80 + 0{,}1 \cdot 1} = 27{,}78 \text{ kg}$$

Aufgabe 79. Wenn in Aufgabe 54 S. 79 der Seildurchmesser $\delta = 2{,}8$ cm, der Zapfenhalbmesser $\varrho = 1{,}8$ cm und das Gewicht des Rades (einschließlich Trommel) $G = 200$ kg angenommen wird, wie groß ist dann bei $f = 0{,}1$ die zum Heben der Last erforderliche Kraft P, und welche Kraft P_1 würde ein Niedersinken der Last verhindern?

Auflösung. Nach den Gleichungen 122) und 123) S. 107 ergibt sich:

$$P = 105{,}3 \text{ kg}; \qquad P_1 = 94{,}7 \text{ kg}$$

Aufgabe 80. Die früheren Aufgaben 58 bis 62 S. 84 und 85 sind mit Berücksichtigung der Reibungswiderstände zu lösen.

Auflösung.

1. Für Aufgabe 58 ist nach Gl. 125) und 126) S. 108 die erforderliche Zugkraft:

$$P = \frac{Q}{2\,\eta}$$

Wird für Hanfseile das Güteverhältnis der losen Rolle nach S. 108 angenommen: $\eta = 0{,}945$, so ergibt sich:

$$P = \frac{200 + 6}{2 \cdot 0{,}945} = 109 \text{ kg}$$

2. Für den Potenzenzug in Aufgabe 59 und 60 gilt zunächst allgemein nach Gl. 127) und 128) S. 109:

$$P = \frac{Q}{2^n \cdot \eta}$$

Bei Berücksichtigung des Rollengewichtes G ist nach Anmerkung auf S. 85 dafür zu setzen:

$$P = \frac{Q + (2^n - 1)\,G}{2^n\,\eta}$$

Für $n = 3$ lose Rollen und $\eta = 0{,}763$ nach S. 110 als Mittelwert für Hanfseile ergibt sich:

$$P = \frac{400 + 7 \cdot 6}{8 \cdot 0{,}763} = \sim 72{,}5 \text{ kg}$$

3. Für den Flaschenzug in Aufgabe 61 gilt allgemein nach Gl. 129) und 130) S. 111:

$$P = \frac{Q}{2\,n\,\eta}\,; \text{ bezw. } P = \frac{Q + G}{2\,n\,\eta}$$

Daraus folgt:

$$Q = 2 n \eta . P - G$$

Für $P = 2 . 75 = 150$ kg; $G = 10$ kg; $n = 4$ und $\eta = 0,62$ nach Tabelle S. 111 ergibt sich:

$$Q = 2 . 4 . 0,62 . 150 - 10 = 744 - 10 = 734 \text{ kg}$$

4. Für den Differentialflaschenzug in Aufgabe 62 gilt allgemein nach Gl. 131) und 132) S. 112 bei Berücksichtigung des Rollengewichtes G:

$$P = \frac{Q + G}{2 \eta} . \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

oder:

$$Q = \frac{2 \eta . P}{1 - \frac{r}{R}} - G$$

Für $P = 50$ kg; $G = 6$ kg; $\frac{r}{R} = \frac{11}{12}$ und $\eta = 0,46$ nach S. 112 wird:

$$Q = 552 - 6 = 546 \text{ kg}$$

Aufgabe 81. Auf eine Schraube, deren mittlerer Halbmesser $\varrho = 2,4$ cm und deren Ganghöhe $h = 1$ cm beträgt, ist ein 40 cm langer einarmiger Hebel gesetzt; am Ende desselben greift eine Kraft $K = 32$ kg an. Welche in der Achsenrichtung der Schraube wirkende Last Q kann damit gehoben werden?

Auflösung. Aus:

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{h}{2 \varrho \pi} = \frac{1}{15,08} = 0,066$$

ergibt sich:

$$\alpha = \infty\ 3^0\,50'$$

Für $f = \text{tg}\,\varphi = 0,08$, also $\varphi = 4^0\,30'$ wird:

$$\alpha + \varphi = 8^0\,20'$$

$$\text{tg}\,(\alpha + \varphi) = 0,146$$

und nach Gl. 136) S. 114:

$$32 . 40 = Q . 2,4 . 0,146$$

daraus:

$$Q = \frac{32 . 40}{2,4 . 0,146} = \infty\ 3650 \text{ kg}$$

Ohne Reibung würde nach Gl. 85) S. 89 sein:

$$32 . 40 = Q . 2,4 . 0,066$$

oder:

$$Q = \frac{32 . 40}{2,4 . 0,066} = \infty\ 8080 \text{ kg}$$

Das Güteverhältnis ist demnach:

$$\eta = \frac{3650}{8080} = 0,45$$

Aufgabe 82. Vermittelst einer Schraubenpresse (Fig. 153) soll ein Druck $Q = 12000$ kg ausgeübt werden.

Gegeben: äußerer Schraubenhalbmesser: $r = 4$ cm
innerer Schraubenhalbmesser: $r_1 = 3,2$ cm
Ganghöhe der Schraube: $h = 1,6$ cm

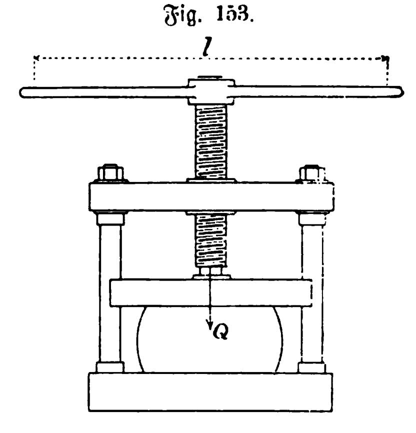
Es ergibt sich der mittlere Schraubenhalbmesser zu:

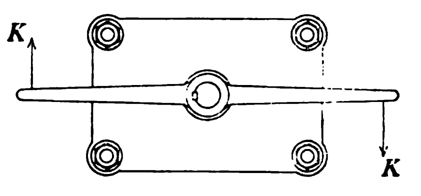
$$\varrho = \frac{r + r_1}{2} = \frac{4 + 3,2}{2} = 3,6 \text{ cm}$$

Der untere Zapfenhalbmesser sei $\varrho_1 = 3$ cm.

Die Drehung der Schraube wird bewirkt durch einen oben aufgesetzten zweiarmigen Hebel von der Länge l = 2 m, an dessen Enden die Kräfte K wirken. Es soll K berechnet werden.

Fig. 153.





Auflösung. Beim Anziehen der flachgängigen Schraubenspindel entsteht an dem Zapfen, der sich mit dem Drucke Q gegen die Preßplatte legt, nach Gl. 102) S. 96 ein Reibungsmoment:

$$\mathfrak{M} = {}^1/_2\, f_1\, Q\, \varrho_1$$

Dieses muß durch das Kraftmoment K l mit überwunden werden; daher ist nach Gl. 136) S. 114:

$$K\, l = Q\, [\varrho \operatorname{tg} (\alpha + \varphi) + {}^1/_2\, f_1\, \varrho_1]$$

Der Winkel α ergibt sich aus:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{2\, \varrho\, \pi} = \frac{1,6}{22,62} = 0,07$$

zu:

$$\alpha = 4^0$$

Für $f = \operatorname{tg} \varphi = 0,1$, also $\varphi = \sim 6^0$ wird:

$$\alpha + \varphi = 10^0$$

$$\operatorname{tg} (\alpha + \varphi) = 0,176$$

Wird der Zapfenreibungs-Koeffizient $f_1 = 0,15$ angenommen, so ergibt sich:

$$K\, l = 12\,000\ (3,6 \,.\, 0,176 + {}^1/_2 \,.\, 0,15 \,.\, 3) = \sim 10\,300 \text{ kg}$$

$$\text{also: } K = \frac{10\,300}{200} = 51,5 \text{ kg.}$$

Ohne Reibung würde nach Gl. 85) S. 89 sein:

$$K = \frac{Q\, \varrho \operatorname{tg} \alpha}{l} = \frac{12\,000 \,.\, 3,6 \,.\, 0,07}{200} = 15,1 \text{ kg}$$

Das Güteverhältnis beträgt danach:

$$\eta = \frac{15,1}{51,5} = 0,29$$

Das Güteverhältnis ergibt sich ebenfalls aus dem Verhältnis der Arbeit der Last zu der Arbeit der Kraft. Bei einer Umdrehung der Schraube legt die Last Q den Weg h (= Ganghöhe), die Kraft 2 K den Weg $l\pi$ zurück; folglich ist:

$$\eta = \frac{Q\, h}{2\, K\, l\, \pi} = \frac{12\,000 \,.\, 1,6}{2 \,.\, 51,5 \,.\, 200 \,.\, 3,14} = 0,29 \text{ (wie oben)}$$

Streng genommen treten noch Reibungswiderstände auf zwischen der Preßplatte und den Führungssäulen; doch sind dieselben so gering, daß sie hier unberücksichtigt bleiben können.

Aufgabe 83. Eine Last G = 1200 kg (z. B. bei einem Schützenaufzug) ist vermittelst einer Hebevorrichtung, bestehend aus Zahnstange und Trieb, sowie Schnecke und Schneckenrad, heraufzuziehen (Fig. 154).

Der Halbmesser des Triebes ist: w = 7,5 cm
Halbmesser der Kurbel auf der Schneckenwelle: l = 40 cm
Kraft an der Kurbel: K = 20 kg

Es soll die Zähnezahl z des Schneckenrades berechnet werden.

Auflösung. Nimmt man das Güteverhältnis des ganzen Schneckengetriebes zu $\eta = 0{,}25$ an, so ist nach Gl. 142) S. 116:

$$z = 4 \frac{Q R}{P r}$$

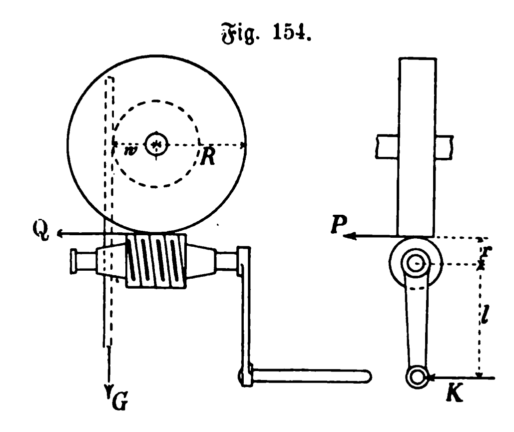
Nun ist hier nach Fig. 154:

$$Q R = G w = 1200 \cdot 7{,}5 = 9000 \text{ kgcm}$$
$$P r = K l = 20 \cdot 40 = 800 \text{ kgcm}$$

Folglich:

$$z = \frac{4 \cdot 9000}{800} = 45 \text{ Zähne.}$$

Fig. 154.



Aufgabe 84. Wenn bei dem Keile in Aufgabe 66 S. 91 die Reibung berücksichtigt, und der Reibungskoeffizient $f = 0{,}15$ angenommen wird, wie groß stellt sich dann die Kraft P heraus?

Auflösung: Aus:

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{2}{32} = 0{,}0625 \text{ folgt: } \frac{\alpha}{2} = \infty\ 3^\circ\,30'$$

ferner aus:

$$f = \operatorname{tg}\varphi = 0{,}15 \qquad " \quad \varphi = 8^\circ\,30'$$

daher:

$$\frac{\alpha}{2} + \varphi = 12^\circ;\ \varphi - \frac{\alpha}{2} = 5^\circ$$

Nach Gl. 144) S. 118 wird dann:

$$P = 2 \,.\, 500 \,.\, \sin 12^0 = 2 \,.\, 500 \,.\, 0{,}2079 = \backsim 208 \text{ kg}$$

Zum Zurücktreiben des Keiles ist nach Gl. 146) eine Kraft erforderlich:

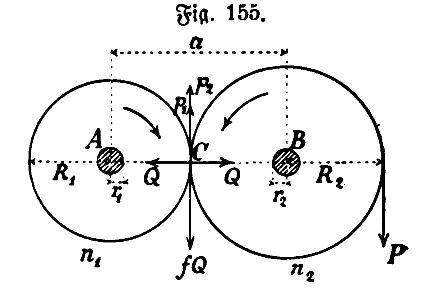
$$P_2 = 2 \,.\, 500 \,.\, \sin 5^0 = 2 \,.\, 500 \,.\, 0{,}0871 = \backsim 87 \text{ kg.}$$

§ 17.

Die Reibungsräder.

Die Drehbewegung einer Welle A kann auf eine andere Welle B übertragen werden durch aufgesetzte Scheiben oder Räder (Fig. 155), welche sich in C berühren und dort mit einem noch zu berechnenden Drucke Q gegeneinander gepreßt werden. Die dabei an dem glatten Umfang der Räder entstehende Reibung dient zur Kraftübertragung.

Fig. 155.



Um die Drehbewegung sicher zu übertragen, darf kein **Gleiten** am Scheibenumfang stattfinden; es müssen daher die Umfangsgeschwindigkeiten beider Räder gleich sein. Also:

$$v = \frac{2 R_1 \pi n_1}{60} = \frac{2 R_2 \pi n_2}{60}$$

Daraus folgt das Übersetzungsverhältnis:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 147)$$

Ist der Wellenabstand a und das Übersetzungsverhältnis i gegeben, so ergeben sich die Radhalbmesser aus:

$$R_1 + R_2 = a$$
$$R_2 = i R_1$$

zu:

$$R_1 = \frac{a}{i + 1}; \quad R_2 = \frac{i\,a}{i + 1} \,{}^{*)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 148)$$

Ist nun P der zu überwindende **Widerstand**, welcher am Umfang des getriebenen Rades angreift, dann muß die durch den Druck Q erzeugte Reibung **mindestens** = P sein; also:

$$fQ \geqq P$$

oder:

$$Q \geqq \frac{P}{f} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 149)$$

---

*) Dasselbe gilt auch für Zahnräder (mit Außenverzahnung).

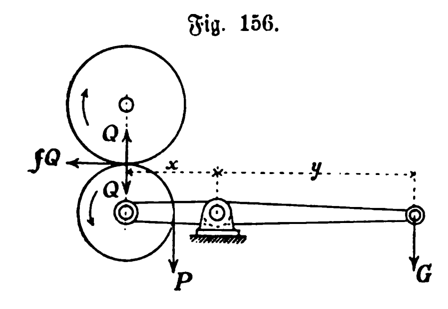
Man kann etwa setzen:

$f = 0{,}10-0{,}15$ für Gußeisen auf Gußeisen
$f = 0{,}15-0{,}20$ „ Papier „ „
$f = 0{,}20-0{,}25$ „ Leder „ „
$f = 0{,}20-0{,}30$ „ Holz „ „

Die kleineren Werte gelten dabei für glatte, fettige Reibungsflächen.

Die Kraft Q kann durch eine federnde Stellvorrichtung oder auch durch ein Gegengewicht G hervorgebracht werden (Fig. 156). Die erforderliche Größe desselben ergibt sich aus:

Fig. 156.



$$G \cdot y = Q \cdot x$$

zu:

$$G = Q \frac{x}{y}$$

Durch das starke Aneinanderpressen der Räder entsteht eine nicht unerhebliche Zapfenreibung. Die Momente derselben sind, wenn mit r_1, r_2 die Wellenhalbmesser bezeichnet werden und f_1 den Zapfenreibungskoeffizienten bedeutet, nach (Gl. 94) S. 94:

$$\mathfrak{M}_1 = f_1 Q r_1 \qquad \mathfrak{M}_2 = f_1 Q r_2$$

Zur Überwindung derselben müssen an den Radumfängen die Kräfte wirken:

$$p_1 = \frac{f_1 Q r_1}{R_1} \qquad p_2 = \frac{f_1 Q r_2}{R_2}$$

im ganzen also:

$$p_1 + p_2 = f_1 Q \left(\frac{r_1}{R_1} + \frac{r_2}{R_2} \right) \quad \ldots\ldots \quad 150)$$

Diese Größe ist der auf dem Scheibenumfang übertragene Kraftverlust durch Zapfenreibung. Das Verhältnis desselben zu der Kraft P ist:

$$\frac{p_1 + p_2}{P} = \frac{f_1 Q}{P} \left(\frac{r_1}{R_1} + \frac{r_2}{R_2} \right)$$

oder für $Q = \frac{P}{f}$:

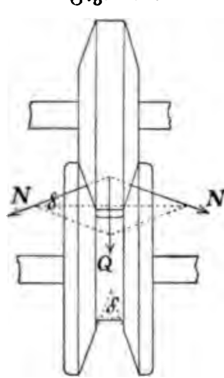
$$\frac{p_1 + p_2}{P} = \frac{f_1}{f} \left(\frac{r_1}{R_1} + \frac{r_2}{R_2} \right) \quad \ldots\ldots \quad 151)$$

Ist anstatt P die Anzahl der Pferdekräfte und die Umdrehungszahlen der beiden Wellen gegeben, so ergibt sich nach (Gl. 19) S. 24:

$$P = 71\,620 \, \frac{1}{R} \cdot \frac{N}{n}$$

R (in cm) und n sind dabei entweder für die treibende oder für die getriebene Welle einzusetzen.

Fig. 157.



Um den Druck Q möglichst klein zu erhalten, werden vielfach die Reibungsräder (Eisen auf Eisen) mit Keilnuten ausgeführt (Fig. 157). Es ist dann:

$$\frac{Q}{2} = N \sin \frac{\delta}{2}$$

oder:

$$N = \frac{Q}{2 \sin \frac{\delta}{2}}$$

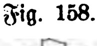
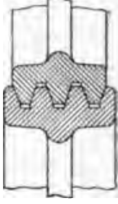


Fig. 158.



Danach ergibt sich die Reibung zu:

$$2 f N = \frac{Q f}{\sin \frac{\delta}{2}}$$

welche wieder mindestens $= P$ zu setzen ist, woraus folgt:

$$Q \geqq \frac{P}{f} \sin \frac{\delta}{2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 152)$$

Der Winkel δ wird gewöhnlich $= 30^0$ angenommen, also:

$$\sin \frac{\delta}{2} = \sin 15^0 = 0{,}26$$

Der erforderliche Druck Q ist danach bei Keilnutenrädern nur ca. $^1/_4$ so groß als bei zylindrischen Reibungsrädern. Dieser Vorteil wird indessen durch den Nachteil der starken Abnutzung in den Keilnuten reichlich aufgewogen. Um die Abnutzung nicht zu groß werden zu lassen, macht man die Eingriffstiefe nur etwa 1 bis 1,2 cm und führt die Räder mit mehreren Keilnuten (bis zu 6) aus (Fig. 158).

Aufgabe 85. Von einer Welle A sollen $N = 4$ Pferdekräfte auf eine Welle B vermittelst Reibungsräder übertragen werden. Es soll der erforderliche Druck Q berechnet werden.

Der Wellenabstand sei $a = 60$ cm
Die treibende Welle A macht $n_1 = 120$ Umdrehungen in der Minute
„ getriebene „ B „ $n_2 = 80$ „ „ „ „

Also:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{120}{80} = \frac{3}{2}$$

Auflösung. Aus den Gleichungen 148) ergeben sich die Radhalbmesser zu:

$$R_1 = \frac{60}{^3/_2 + 1} = 24 \text{ cm}$$

$$R_2 = \frac{^3/_2 \,.\, 60}{^3/_2 + 1} = 36 \text{ cm}$$

Nach Gl. 19) S. 24 ist mit Einsetzung von $R_2 = 36$ und $n_2 = 80$ (für die getriebene Welle):

$$P = 71\,620 \cdot \frac{1}{36} \cdot \frac{4}{80} = \infty\ 100\ \text{kg}$$

Derselbe Wert ergibt sich mit Einsetzung von $R_1 = 24$ und $n_1 = 120$ (für die treibende Welle).

Zur Überwindung der Zapfenreibung ist für $r_1 = r_2 = 3$ cm; $f = 0{,}125$ (Mittelwert für Eisen auf Eisen) und $f_1 = 0{,}08$ nach Gl. 151) erforderlich:

$$p_1 + p_2 = 100 \cdot \frac{0{,}08}{0{,}125} \cdot \left(\frac{3}{24} + \frac{3}{36}\right) = \infty\ 14\ \text{kg}$$

so daß der Gesamtwiderstand am Radumfang beträgt:

$$P_1 = P + (p_1 + p_2) = 100 + 14 = 114\ \text{kg}$$

Für glatte Reibungsräder ist dann nach Gl. 149):

$$Q = \frac{P_1}{f} = \frac{114}{0{,}125} = 912\ \text{kg}$$

Für Keilnutenräder mit $\delta = 30^0$ $\left(\sin \frac{\delta}{2} = 0{,}26\right)$ würde nach Gl. 152) nur erforderlich sein:

$$Q = 0{,}26 \,.\, 912 = \infty\ 237\ \text{kg}$$

Diese Anpressungsdrücke Q sind gerade genügend, um ein Gleiten an den Radumfängen zu verhindern; sind daher als die unteren Grenzwerte anzusehen und müssen zur Sicherheit (da ein Gleiten auf keinen Fall eintreten darf) praktisch etwas stärker angenommen werden.

§ 18.

Die Riemenscheiben.

Die Riemenscheiben haben den Zweck, die Drehung einer Welle A auf eine andere, der ersteren meist parallele Welle B zu übertragen, wenn deren Abstand so groß ist, daß die Anwendung von Rädern mit unmittelbarer Berührung (Reibungsrädern oder Zahnrädern) unzweckmäßig erscheint. Zur Kraftübertragung dient dabei als Zwischenmittel ein Riemen, welcher sich mit einer gewissen Spannung um die Scheiben legt und dadurch am Umfange derselben die erforderliche Reibung erzeugt.

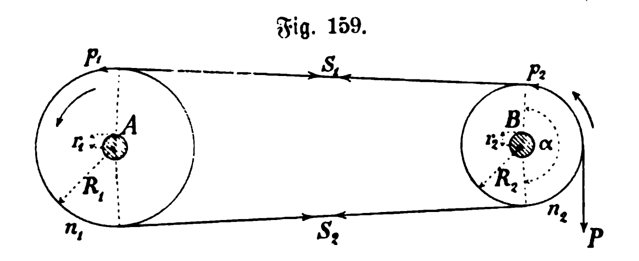
Es sei (Fig. 159) A die treibende, B die getriebene Welle; P der zu überwindende Widerstand am Umfang der getriebenen Scheibe.

Der ziehende Riemen ist der, welcher auf die treibende Scheibe aufläuft; der gezogene Riemen ist der, welcher von der treibenden Scheibe abläuft.

Für die Riemenspannungen sollen folgende Bezeichnungen gelten:

S_1 = Spannung im ziehenden Riemen.
S_2 = „ „ gezogenen „
S_0 = „ „ ruhenden „

Fig. 159.



Es läßt sich nachweisen, daß die Spannung S_0 des ruhenden Riemens nahezu übereinstimmt mit dem arithmetischen Mittel aus den Spannungen S_1 und S_2 des bewegten Riemens; also:

$$S_1 + S_2 = 2\,S_0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 153)$$

Die Gleichgewichtsbedingung für die getriebene Scheibe während der Bewegung ist:

$$S_1 - S_2 = P \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 154)$$

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$\left.\begin{array}{l} S_1 = S_0 + {}^1/_2 P \\ S_2 = S_0 - {}^1/_2 P \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 155)$$

Die Spannung S_0 muß nun so groß angenommen werden, daß, wenn bei der Bewegung die Spannungen S_1 und S_2 eingetreten sind, kein Gleiten des Riemens stattfindet. Die Bedingung dafür ist:

$$S_2 \,.\, e^{f\alpha} \geqq S_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 156)$$

worin e die Grundzahl der natürlichen Logarithmen ($e = 2{,}71828 \ldots$), f den Reibungskoeffizient zwischen Riemen und Scheiben und α den Winkel des bei der kleineren Scheibe umspannten Bogens bedeutet.*)

Aus Gl. 156) folgt:

$$S_2\, e^{f\alpha} - S_2 \geqq S_1 - S_2$$

oder da $S_1 - S_2 = P$:

$$S_2\,(e^{f\alpha} - 1) \geqq P$$

so daß sich für die Spannung S_2 ergibt:

$$S_2 \geqq P \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 157)$$

Nach Gl. 154) erhält man dann:

$$S_1 \geqq P \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 158)$$

*) Eine elementare Ableitung der Gl. 156) findet sich u. a. in Ritter, Lehrbuch der technischen Mechanik, wenn dabei auch streng genommen die Bestimmung des Grenzwertes von $\left(1 + \frac{f\alpha}{n}\right)^n$ für $n = \infty$ schon aus dem Rahmen der niederen Mathematik heraustritt.

und nach Gl. 153):

$$S_0 \geqq \frac{P}{2} \cdot \frac{e^{f\alpha} + 1}{e^{f\alpha} - 1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 159)$$

Bei gleichen Scheiben (Übersetzungsverhältnis $i = 1$) ist $\alpha = \pi = 3{,}14$. Für Lederriemen auf Eisenscheiben ($f = 0{,}28$) wird dann:

$$e^{f\alpha} = 2{,}718 \ldots^{0{,}28 \cdot 3{,}14} \ldots = 2{,}4$$

Folglich:

$$S_0 \geqq \frac{P}{2} \cdot \frac{2{,}4 + 1}{2{,}4 - 1} \geqq 1{,}215\,P \quad \ldots \ldots \quad 160)$$

Praktisch nimmt man dafür bei nicht zu großen Riemengeschwindigkeiten ($v < 10$ m) für Lederriemen auf Eisenscheiben:

$$S_0 = 1{,}5\,P$$

Folglich nach den Gleichungen 155):

$$S_1 = 2\,P \qquad S_2 = P \quad \ldots \ldots \ldots \quad 161)$$

Für Lederriemen auf Holzscheiben wird (bei $f = 0{,}47$ und $e^{f\alpha} = 4{,}38$):

$$S_0 > 0{,}8\,P$$

Dafür nimmt man praktisch:

$$S_0 = P$$

also nach den Gleichungen 155):

$$S_1 = 1{,}5\,P \qquad S_2 = 0{,}5\,P \quad \ldots \ldots \ldots \quad 162)$$

Für Drahtseilbetrieb wird:

$$S_1 = 2\,P \qquad S_2 = P \quad \ldots \ldots \ldots \quad 163)$$

Für Hanfseilbetrieb genügt:

$$S_1 = {}^5/_3\,P \qquad S_2 = {}^2/_3\,P \quad \ldots \ldots \ldots \quad 164)$$

Die Wellen erhalten den Druck $S_1 + S_2 = 2\,S_0$. Der hierdurch entstehende Kraftverlust infolge Zapfenreibung ist genau so zu berechnen wie bei Reibungsrädern (§ 17).

Man erhält (vergl. Gl. 150) S. 124):

$$\frac{p_1 + p_2}{P} = f_1 \frac{e^{f\alpha} + 1}{e^{f\alpha} - 1} \cdot \left(\frac{r_1}{R_1} + \frac{r_2}{R_2}\right) \quad \ldots \ldots \quad 165)$$

Aufgabe 86. Durch einen Riemen sind $N = 3$ Pferdekräfte von einer Welle A auf eine Welle B zu übertragen bei $i = 1$; also $\alpha = \pi = 3{,}14$.

Gegeben:

$$R_1 = R_2 = 36 \text{ cm}$$
$$r_1 = r_2 = 2{,}5 \text{ cm}$$
$$n_1 = n_2 = 80$$

Angenommen: $f = 0{,}28$ (für Lederriemen auf gußeisernen Scheiben) und Zapfenreibungskoeffizient: $f_1 = 0{,}08$.

Es sollen die Riemenspannungen berechnet werden.

Auflösung. Nach Gl. 19) S. 24 ist:

$$P = 71\,620 \cdot \frac{1}{36} \cdot \frac{3}{80} = \backsim 75 \text{ kg}$$

Zur Überwindung der Zapfenreibung ist bei $e^{f\alpha} = 2{,}4$ nach Gl. 165) erforderlich:

$$p_1 + p_2 = 75 \;.\; 0{,}08 \;.\; \frac{2{,}4+1}{2{,}4-1}\left(\frac{2{,}5}{36} + \frac{2{,}5}{36}\right) = \backsim 2 \text{ kg}$$

Danach beträgt der Gesamtwiderstand am Scheibenumfang:

$$P_1 = P + (p_1 + p_2) = 75 + 2 = 77 \text{ kg}$$

Nach Gl. 159) ist dann der untere Grenzwert für die Spannung des ruhenden Riemens:

$$S_0 = \frac{77}{2} \cdot \frac{2{,}4+1}{2{,}4-1} = 93{,}5 \text{ kg}$$

Die Mindestspannungen des ziehenden und des gezogenen Riemens ergeben sich nach den Gleichungen 158) und 157) zu:

$$S_1 = 77 \cdot \frac{2{,}4}{2{,}4-1} = 132 \text{ kg}$$

$$S_2 = 77 \cdot \frac{1}{2{,}4-1} = 55 \text{ kg}$$

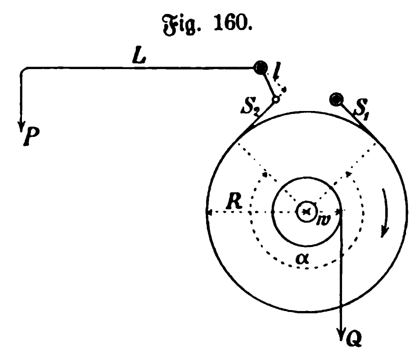
§ 19.

Die Bandbremsen.

An jeder Aufzugsmaschine (Winde, Kran usw.) muß eine Bremsvorrichtung angebracht sein, die dazu dient, die gehobene Last nach Ausrückung des auf der Kurbelwelle befindlichen Triebes langsam und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit herabzulassen. Dazu sind besonders die Bandbremsen in Gebrauch.

Man setzt auf die Trommelwelle (oder bei Winden für größere Lasten auf die Vorgelegewelle) eine außen glatt abgedrehte Scheibe, um welche ein dünnes schmiedeisernes Band gelegt wird. Wird dieses vermittelst einer Hebelvorrichtung mit seinen beiden Enden zusammengepreßt, so übt dasselbe an dem umspannten Umfang der Scheibe Normalpressungen aus. Infolge davon entstehen Reibungswiderstände, welche der Drehung der Scheibe entgegenwirken und bei genügender Größe dem Lastmoment das Gleichgewicht halten.

Fig. 160.



Sind (Fig. 160) S_1 und S_2 die Spannungen in den beiden Enden des Bremsbandes, so ist die Summe der Reibungswiderstände $= S_1 - S_2$.

Wenn also Gleichgewicht vorhanden sein soll, so muß sein:

$$(S_1 - S_2)\,R = Q\,w \quad \ldots\ldots\ldots \quad 166)$$

Nach Gl. 156) S. 127 ist nun:

$$S_1 = S_2 e^{f\alpha}$$

lglich:

$$S_1 - S_2 = S_2 (e^{f\alpha} - 1)$$

der nach Gl. 166):

$$S_2 \, (e^{f\alpha} - 1) \, R = Q \, w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 167$$

In bezug auf den Winkelhebel ist:

$$P L = S_2 l$$

oder:

$$P = S_2 \frac{l}{L}$$

Wird für S_2 der Wert aus Gl. 167) eingesetzt, so ergibt sich:

$$P = \frac{Q\,w}{R} \cdot \frac{l}{L} \cdot \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 168$$

P ist die Kraft des Arbeiters und kann zu etwa 30 kg angenommen werden Das Lastmoment Q w ist gegeben; den Halbmesser R der Bremsscheibe wähl man gewöhnlich etwas kleiner als den Halbmesser des auf derselben Well sitzenden Zahnrades. Die Hebellänge l wird so klein, wie es praktisch möglic ist, ausgeführt (etwa 6 cm), so daß in Gl. 168) die Hebellänge L die einzig Unbekannte ist. Man erhält hierfür:

$$L = \frac{Q\,w}{P} \, \frac{l}{R} \, \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 169$$

Der Reibungskoeffizient zwischen Band und Scheibe (Schmiedeisen und Gußeise kann angenommen werden zu:

$f = 0{,}18$ ohne Schmierung,
$f = 0{,}1$ mit "

Der Winkel des umspannten Bogens ist etwa:

$$\alpha = {}^3/_4 \, . \, 2\pi = {}^3/_2 \, . \, 3{,}14 = 4{,}7$$

Für diese Werte wird dann:

$$e^{f\alpha} = 2{,}33; \text{ also: } \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} = 0{,}75 \text{ ohne Schmierung}$$

$$e^{f\alpha} = 1{,}6; \text{ also: } \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} = 1{,}67 \text{ mit } \quad "$$

Aufgabe 87. Gegeben z. B. $Q\,w = 12\,000$ kgcm; $P = 30$ kg; R = $l = 6$ cm;

$$\frac{1}{e^{f\alpha} - 1} = 0{,}75$$

also nach Gl. 169):

$$L = \frac{12\,000 \, . \, 6}{30 \, . \, 25} \cdot 0{,}75 = 72 \text{ cm}$$

Abschnitt III.

Die Lehre von der Bewegung fester Körper mit Rücksicht auf ihre Ursachen (Dynamik fester Körper).

§ 20.

Bewegung auf der schiefen Ebene.

Befindet sich ein Körper von der Masse m auf einer um den Winkel α gegen die Wagerechte geneigten Ebene $AC = l$ (Fig. 161), so zerlegt sich das Gewicht desselben $G = mg$ in die Seitenkräfte $N \perp AC$ und $P \parallel AC$, von denen die erstere durch den Gegendruck der schiefen Ebene aufgehoben wird, während die letztere dem Körper ohne Berücksichtigung der Widerstände (Reibungen, Luftwiderstand) eine gleichförmig beschleunigte Abwärtsbewegung erteilt. Die Beschleunigung ist nach Gl. 13) S. 15:

$$p = \frac{P}{m}$$

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke DES und ABC folgt:

$$\frac{SD}{SE} = \frac{BC}{AC} \quad \text{oder:} \quad \frac{P}{mg} = \frac{h}{l}$$

daher:

$$P = mg\frac{h}{l}$$

Für die Beschleunigung ergibt sich dann:

$$p = g\frac{h}{l} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 170)$$

Die Gl. 170) läßt sich auch schreiben:

$$p : g = h : l$$

oder in Worten:

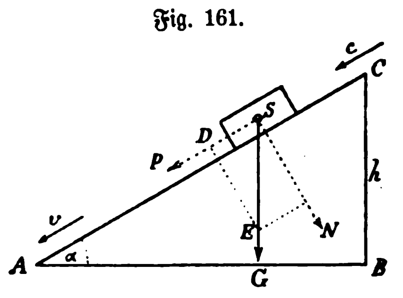
Die Beschleunigung auf der schiefen Ebene verhält sich zu der Fallbeschleunigung wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Die rechtwinklig zu AC gerichtete Kraft N verrichtet die mechanische Arbeit Null. Die während der Bewegung des Körpers von C nach A von der Kraft P verrichtete mechanische Arbeit ist:

$$\mathfrak{A} = Pl = mg\frac{h}{l}\,l = mgh$$

Ebenso groß ist auch die mechanische Arbeit, welche von der Kraft

Fig. 161.



$G = mg$ verrichtet wird, wenn der Körper die Höhe h von C nach B frei durchfallen würde.

Da nach § 5 S. 25 die mechanische Arbeit gleich der Zunahme an lebendiger Kraft ist, so erhält man, wenn die Geschwindigkeiten des Körpers am Anfang und am Ende der Bewegung (in den Punkten C und A) mit c und v bezeichnet werden:

$$\frac{m v^2}{2} - \frac{m c^2}{2} = m g h$$

Daraus ergibt sich die Größe der Endgeschwindigkeit zu:

$$v = \sqrt{c^2 + 2 g h} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 171)$$

Ist die Anfangsgeschwindigkeit c = Null, so wird:

$$v = \sqrt{2 g h} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 172)$$

Fiele der Körper von C nach B frei herab, so würde er in B mit derselben Endgeschwindigkeit v ankommen.

Aufgabe 88. Ein Eisenbahnwagen bewegt sich mit der Anfangsgeschwindigkeit Null auf einer unter 1:80 geneigten Bahnstrecke. Wie groß ist (ohne Berücksichtigung der Widerstände) dessen Beschleunigung p; wie groß der nach 30 sec. zurückgelegte Weg und wie groß die Geschwindigkeit v?

Auflösung. Nach Gl. 170) ist:

$$p = 9{,}81 \cdot \frac{1}{80} = 0{,}123$$

Nach Gl. 12) S. 7 ist:

$$s = \frac{p t^2}{2} = 0{,}123 \cdot \frac{30^2}{2} = 55{,}35 \text{ m}$$

Der Endpunkt der Bewegung liegt daher um:

$$h = \frac{55{,}17}{80} = 0{,}69 \text{ m}$$

tiefer als der Anfangspunkt; folglich ist nach Gl. 172):

$$v = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}69} = 3{,}68 \text{ m}^{*)}$$

§ 21.

Wurfbewegung.

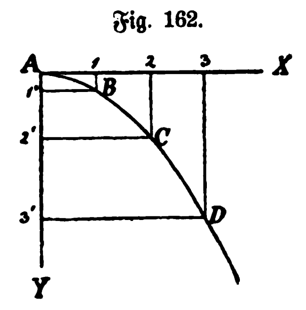
Wird ein Körper von A aus in der wagerechten Richtung AX (Fig. 162) mit der Geschwindigkeit c geworfen, so würde er sich, wenn keine anderen Kräfte auf ihn einwirkten, nach dem Gesetze der Trägheit mit unveränderter Geschwindigkeit in derselben Richtung weiter fortbewegen. Ist also:

$$A1 = 12 = 23 = \ldots = c$$

*) Vergl. Anhang Tabelle III b.

so würde der Körper am Ende der ersten Sekunde im Punkte 1, am Ende der zweiten Sekunde im Punkte 2 usw. ankommen. Vermöge der Schwerkraft wird aber der Körper gleichzeitig mit der Beschleunigung $g = 9{,}81$ m senkrecht abwärts fallen, und zwar sind (für die Anfangsgeschwindigkeit Null) die durchfallenen Wegeslängen nach Gl. 12) S. 7:

Fig. 162.



$$s = g\,\frac{t^2}{2}$$

zu berechnen. Setzt man hierin für t der Reihe nach die Werte 1, 2, 3 . . . sec. ein, so erhält man:

$$A1' = \frac{g}{2}\cdot 1$$

$$A2' = \frac{g}{2}\cdot 2^2 = \frac{g}{2}\cdot 4$$

$$A3' = \frac{g}{2}\cdot 3^2 = \frac{g}{2}\cdot 9$$

. . . .

Zeichnet man aus den in gleichen Zeiten wagerecht und senkrecht durchlaufenen Wegeslängen Parallelogramme, so geben die dem Punkte A gegenüberliegenden Eckpunkte derselben die wirkliche Lage des Körpers nach Verlauf der betreffenden Zeiten an. Nach 1, 2, 3 . . . Sekunden wird daher der Körper sich in B, C, D . . . befinden. Legt man durch die Punkte A, B, C, D . . . eine Kurve, so ist diese die Bahn des geworfenen Körpers (die Wurflinie). Diese Bahn ist eine Parabel, deren Scheitel in A liegt, und deren Achse die Gerade AY ist. Nach der Parabel krümmt sich z. B. auch ein mit einer gewissen Geschwindigkeit wagerecht aus einer Ausflußöffnung austretender Wasserstrahl (siehe Fig. 198).

Fig. 163.

In ähnlicher Weise ergibt sich die Wurflinie ABCD . . . (Fig. 163) eines in der Richtung AX schräg aufwärts geworfenen Körpers durch Zusammensetzung zweier Bewegungen, von denen die eine in der Richtung AX gleichförmig, die andere in der lotrechten Richtung AY gleichförmig beschleunigt ist.

Der Winkel α, den die Linie AX mit der Wagerechten bildet, heißt der Steigungswinkel (Erhöhungs- oder Elevationswinkel); die Höhe $MN = h$ (M ist der Scheitel der Parabel) ist die Wurfhöhe; die Wagerechte $AA_1 = l$ die Wurfweite.

Zerlegt man die Anfangsgeschwindigkeit c des Körpers nach wagerechter und senkrechter Richtung, so ist:

die Geschwindigkeit in wagerechter Richtung $= c \cos \alpha$

die Geschwindigkeit in senkrechter Richtung $= c \sin \alpha - g t$ (vergl. Gl. 9, S. 7).

Da letztere im höchsten Punkte M der Bahn = Null ist, so folgt daraus:

$$t = \frac{c \sin \alpha}{g} \qquad 173)$$

Um von M nach dem Punkte A_1 zu gelangen, braucht der Körper dieselbe Zeit t; daher ergibt sich die gesamte Wurfzeit zu:

$$T = \frac{2 c \sin \alpha}{g} \qquad 174)$$

Die Wurfweite ist:

$$l = c \cos \alpha T = c \cos \alpha \frac{2 c \sin \alpha}{g}$$

oder (da $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2 \alpha$):

$$l = \frac{c^2 \sin 2 \alpha}{g} \qquad 175)$$

Die in der Zeit t erreichte Wurfhöhe ist (nach Gl. 8, S. 6):

$$h = c \sin \alpha t - \frac{g t^2}{2}$$

oder, wenn für t der Wert aus Gl. 173) eingesetzt wird:

$$h = \frac{c^2 \sin^2 \alpha}{2 g} \qquad 176)$$

Nach Gl. 175) ergibt sich die größte Wurfweite für:

$$\sin 2 \alpha = 1 \text{ oder: } \alpha = 45^0$$

zu:

$$l_{max} = \frac{c^2}{g} \qquad 177)$$

Bei zwei Steigungswinkeln, von denen der eine ebensoviel über, wie der andere unter 45° ist, wird dieselbe Wurfweite erreicht.

Die obigen Gleichungen sind nur dann vollständig richtig, wenn die Bewegung im luftleeren Raume erfolgt. Durch den Einfluß des Luftwiderstandes weicht bei größeren Geschwindigkeiten die wirkliche Wurflinie wesentlich von der parabolisch-symmetrischen Form ab.

Aufgabe 89. Wie groß ist die Wurfzeit, Wurfweite und Wurfhöhe eines Geschosses bei einer Anfangsgeschwindigkeit c = 500 m und einem Steigungswinkel von 30°?

Auflösung.

Für $\alpha = 30^0$ ist $\sin \alpha = 0{,}5$; $\sin 2 \alpha = 0{,}866$

Folglich nach Gl. 174):

$$T = \frac{2 \cdot 500 \cdot 0{,}5}{9{,}81} = 51 \text{ sec}$$

nach Gl. 175):

$$l = \frac{500^2 \cdot 0{,}866}{9{,}81} = \sim 22\,000 \text{ m}$$

nach Gl. 176):

$$h = \frac{500^2 \cdot 0{,}5^2}{2 \cdot 9{,}81} = \sim 3200 \text{ m}$$

Bei $\alpha = 45^0$ würde die größte Wurfweite nach Gl. 177) betragen:

$$l_{max} = \frac{500^2}{9{,}81} = \sim 25000 \text{ m}$$

§ 22.

Gleichförmige Kreisbewegung (Zentripetalkraft).

Führt ein Körper eine gleichförmige Kreisbewegung aus, so ist die Ablenkung aus der geradlinigen Bewegung die Wirkung einer Kraft, der sogen. Zentripetalkraft, welche den Körper stets nach dem Mittelpunkte des Kreises (dem Zentrum) hinzieht.

Es sei (Fig. 164) A die augenblickliche Lage des Körpers und AB der von demselben in der unendlich kleinen Zeit t mit der Geschwindigkeit v durchlaufene Kreisbogen. Vermöge der Trägheit hat der Körper das Bestreben, sich von A aus in der Richtung der Tangente AT fortzubewegen, und würde ohne Vorhandensein der Zentripetalkraft nach tsec nicht in B, sondern in E ankommen; sich also um das Maß BE von dem Mittelpunkte C des Kreises weiter entfernt haben.

Fig. 164.

Zieht man BD || AT, so ist AD = s der Weg, welchen der Körper in derselben Zeit t unter der alleinigen Einwirkung der Zentripetalkraft durchlaufen hätte.

Die gleichförmige Kreisbewegung kann also aufgefaßt werden als zusammengesetzt aus zwei Bewegungen, von denen die eine gleichförmig und in jedem Punkte des Kreises tangential gerichtet ist; die andere (durch die Zentripetalkraft bewirkte) gleichförmig beschleunigt und nach dem Mittelpunkte des Kreises gerichtet ist.

Ist v die Geschwindigkeit der Kreisbewegung, so ist der Bogen AB = vt. Da aber t unendlich klein angenommen wurde, so kann man den Bogen AB mit der halben Sehne DB = l vertauschen und erhält dann:

$$l = vt$$

Bezeichnet man die Beschleunigung, welche dem Körper von der Zentripetalkraft erteilt wird, mit p, so ist nach Gl. 12) S. 7:

$$s = \frac{p t^2}{2}$$

Nach Fig. 164 ist:

$$BD^2 = BC^2 - CD^2$$

oder:

$$l^2 = r^2 - (r - s)^2 = 2 r s - s^2$$

Da s im Vergleich zu r sehr klein ist, so kann man genügend genau dafür setzen:

$$l^2 = 2 r s$$

Werden für l und s die oben gefundenen Werte eingesetzt, so ist:

$$v^2 t^2 = 2 r \cdot \frac{p t^2}{2}$$

woraus sich für die Zentripetalbeschleunigung p der Wert ergibt:

$$p = \frac{v^2}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 178)$$

Für die Zentripetalkraft C erhält man danach die Größe:

$$C = \frac{m v^2}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 179)$$

Nach dem Gesetz der Gegenwirkung (§ 4 S. 17) hat die Zentripetalkraft eine Gegenkraft von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung, die vom Mittelpunkte C der Kreisbewegung in der Richtung des Halbmessers nach außen wirkt. Diese Kraft heißt die Zentrifugalkraft. Sie wirkt nicht auf den Körper selbst, da sich an diesem sonst Zentripetal- und Zentrifugalkraft im Gleichgewichte halten würden, und der Körper dann keine Kreisbewegung ausführen könnte, sondern sich geradlinig fortbewegen müßte; sie wirkt vielmehr auf den Drehpunkt C und sucht diesen aus seiner Lage zu bringen. Ist z. B. der sich kreisförmig bewegende Körper eine Kugel, welche mit dem Drehpunkte durch einen Faden verbunden ist, so äußert sich die Zentrifugalkraft in der Spannung des Fadens und wird durch den Faden auf den Drehpunkt C übertragen.

Dem Ausdrucke für die Zentripetalkraft läßt sich noch eine andere Form geben, indem man statt der Umfangsgeschwindigkeit die Winkelgeschwindigkeit einführt.

Unter der Winkelgeschwindigkeit versteht man den Winkel, um welchen sich bei der Kreisbewegung der Halbmesser in einer Sekunde dreht.

Nimmt man denjenigen Winkel, dessen Bogen gleich dem Halbmesser ist, als Winkeleinheit an, so ist nach Fig. 165:

$$\frac{\sphericalangle 1}{360^0} = \frac{r}{2 r \pi}$$

oder:

$$\sphericalangle 1 = \frac{360}{2 \cdot 3{,}14 \ldots} = 57^0\ 17'\ 45'' \quad . \quad 180)$$

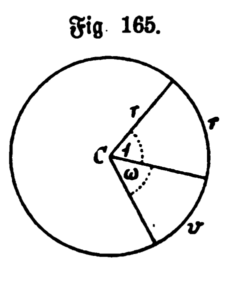


Fig. 165.

Ferner ist nach Fig. 165, wenn die Umfangsgeschwindigkeit (als Teil des Kreisbogens) mit v, die zugehörige Winkelgeschwindigkeit mit ω bezeichnet wird:

$$\frac{v}{r} = \frac{\omega}{1}$$

oder:

$$v = r\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 181)$$

d. h.:

Bogen = Halbmesser × Winkel.

Durch Einsetzung des Wertes für v in Gl. 179) erhält man dann für die Zentripetalkraft:

$$C = m r \omega^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 182)$$

Aufgabe 90. Das eine Ende eines 3 m langen Fadens ist an einem festen Punkte C, das andere Ende an einer 4 kg schweren Kugel befestigt. Wenn letzterer eine Geschwindigkeit v = 8 m rechtwinklig zur Richtung des Fadens erteilt wird, wie groß ist die auf die Kugel wirkende Zentripetalkraft?

Auflösung. Nach Gl. 179):

$$C = \frac{m v^2}{r} = \frac{G}{g} \frac{v^2}{r} = \frac{4}{9{,}81} \cdot \frac{8^2}{3} = 8{,}7 \text{ kg}$$

Aufgabe 91. Um wieviel muß in einer Eisenbahnkurve vom Halbmesser r die äußere Schiene gegen die innere erhöht werden, damit die Räder eines Wagens, welcher sich mit der Geschwindigkeit v in der Kurve bewegt, nicht gegen die äußere Schiene gepreßt werden?

Auflösung. Es sei S (Fig. 166) der Schwerpunkt des Wagens. Die Mittelkraft R aus dem Wagengewichte G und der Zentrifugalkraft C muß rechtwinklig gegen die Gleisoberfläche stehen; daher ist nach den Bezeichnungen der Fig. 166:

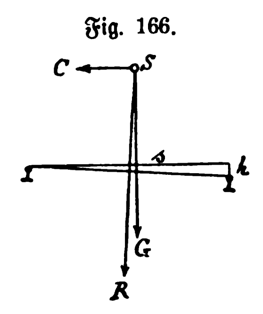


Fig. 166.

$$\frac{h}{s} = \frac{C}{G} \quad \text{oder:} \quad h = \frac{C}{G} s$$

Setzt man für C den Wert aus Gl. 179):

$$C = \frac{m v^2}{r} = \frac{G}{g} \frac{v^2}{r}$$

ein, so folgt:

$$h = \frac{G}{g} \frac{v^2}{r} \frac{s}{G} = \frac{s v^2}{g r}$$

Für $g = \sim 10$ und $s = \sim 1{,}5$ m wird die erforderliche Überhöhung:

$$h = 0{,}15 \frac{v^2}{r} \text{*)}$$

Aufgabe 92. Wie groß muß die Neigung eines Reiters in einer kreisförmigen Reitbahn von 5 m Halbmesser bei einer Geschwindigkeit $v = 4$ m sein?

Auflösung. Ist α der Winkel des Reiters gegen die Senkrechte, so ist:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C}{G} = \frac{v^2}{g\,r} = \frac{4^2}{9{,}81 \,.\, 5} = 0{,}326$$

also:

$$\alpha = \sim 18^0$$

§ 23.

Geradlinig schwingende Bewegung.

Eine gleichförmige Kreisbewegung kann auch angesehen werden als zusammengesetzt aus zwei nach den Richtungen XX und YY (Fig. 167) rechtwinklig zu einander gerichteten Seitenbewegungen. Betrachtet man von diesen nur die eine, z. B. die wagerechte Seitenbewegung, so wird der Körper die geradlinige Strecke AB in derselben Zeit t durchlaufen, in welcher bei der kreisförmigen Bewegung der Halbkreis ADB mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v durchlaufen wurde. Es ist daher nach Gl. 3) S. 5:

$$t = \frac{r\pi}{v}$$

Wird für v der sich aus Gl. 179) S. 136 ergebende Wert:

$$v = \sqrt{\frac{C\,r}{m}}$$

---

*) Bei den badischen Staatseisenbahnen beträgt die Überhöhung:

$$h = \frac{45}{r} \text{ für Hauptbahnen (mit } r = 300 - 1000 \text{ m.)}$$

$$\text{bezw. } h = \frac{24}{r} \text{ für Nebenbahnen (mit } r = 180 - 700 \text{ m.)}$$

Diesen Werten entsprechen mittlere Zuggeschwindigkeiten v, welche sich wie folgt ergeben:

für Hauptbahnen: $h = 0{,}15 \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{45}{r}$

$$v = \sqrt{\frac{45}{0{,}15}} = \sim 17{,}3 \text{ m.}$$

für Nebenbahnen: $h = 0{,}15 \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{24}{r}$

$$v = \sqrt{\frac{24}{0{,}15}} = \sim 12{,}6 \text{ m.}$$

eingesetzt, so folgt:

$$t = r\pi \sqrt{\frac{m}{C r}} = \pi \sqrt{\frac{m r}{C}}$$

oder:

$$t = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{C}{r}\,\frac{1}{m}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 183)$$

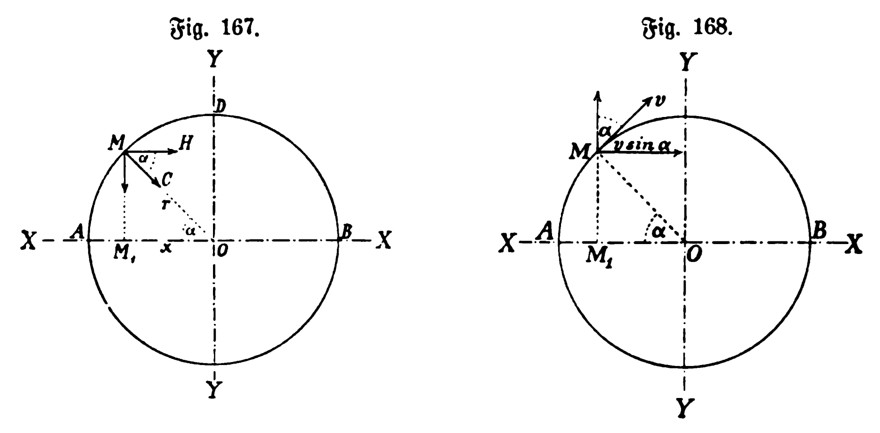
Ist nun M derjenige Punkt, in welchem sich der Körper bei der gleichförmigen Kreisbewegung in einem bestimmten Zeitpunkte befindet, so wird er bei der wagerechten Seitenbewegung in demselben Zeitpunkte die Lage M_1 (senkrecht unter M) haben, und die in diesem Augenblick auf ihn einwirkende Kraft ist die wagerechte Seitenkraft H der die Kreisbewegung erzeugenden Zentripetalkraft C. Nach Fig. 167 ist:

$$H = C \cos \alpha = C\,\frac{x}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 184)$$

Da in diesem Ausdrucke C und r unveränderliche Größen sind, so folgt, daß die treibende Kraft proportional der Entfernung x ist. Sie erreicht ihren größten Wert $H_{max} = \pm C$ für $x = \pm r$, also in den Punkten A und B; wird = Null für x = Null, also im Punkte O. Für x = 1 wird:

$$H_1 = \frac{C}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 185)$$

Fig. 167. Fig. 168.



Zerlegt man (Fig. 168) im Punkte M die Umfangsgeschwindigkeit v nach den Richtungen XX und YY in ihre Seitengeschwindigkeiten, so ist $v \sin \alpha$ (|| XX) diejenige Geschwindigkeit, welche der Körper bei seiner Seitenbewegung im Punkte M_1 besitzt. Diese Geschwindigkeit hat im Punkte A die Größe Null, wird allmählich größer und erreicht ihren größten Wert v im Punkte O; nimmt dann wieder ab bis B, wo sie wiederum gleich Null ist. Darauf wird die Geschwindigkeit negativ, d. h. der Körper wird die umgekehrte Bewegung von B nach A ausführen.

Solche geradlinig hin- und hergehende Bewegungen nennt man oszillierende Bewegungen oder geradlinige Schwingungen; der Punkt O ist das Schwingungszentrum; die Strecke OA = OB = r die Schwingungsweite oder Amplitude.

Wird der sich aus Gl. 184) ergebende Wert:

$$\frac{C}{r} = \frac{H}{x}$$

in Gl. 183) eingesetzt, so folgt:

$$t = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{H}{x} \cdot \frac{1}{m}}} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{H}{m} \cdot \frac{1}{x}}}$$

$\frac{H}{m} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$ ist die Beschleunigung, welche dem Körper im Punkte M_1 von der treibenden Kraft erteilt wird. Bezeichnet man diese Beschleunigung mit p, so wird:

$$t = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{p}{x}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 186)$$

Für x = 1 ist:

$$t = \frac{\pi}{\sqrt{p_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 187)$$

Darin bedeutet p_1 die Schwingungsbeschleunigung in der Entfernung 1 vom Schwingungszentrum.

§ 24.

Das Pendel.

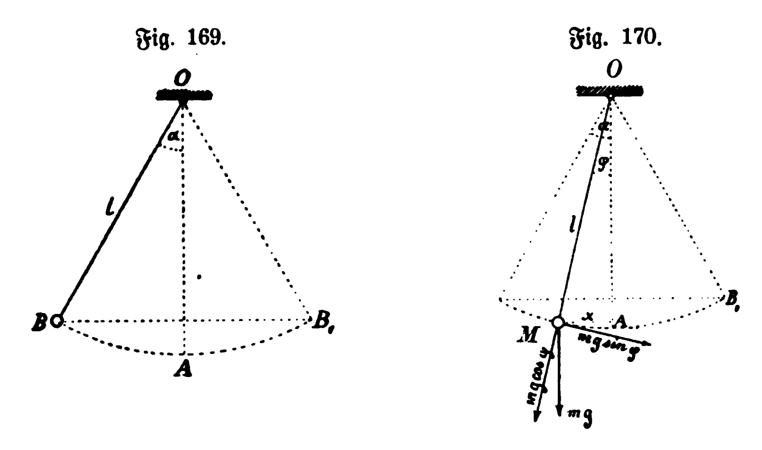
Unter einem physischen oder zusammengesetzten Pendel versteht man jeden schweren Körper, welcher um eine, nicht durch seinen Schwerpunkt gehende Achse drehbar ist. Unter einem mathematischen oder einfachen Pendel dagegen denkt man sich eine am oberen Ende festgehaltene gewichtslose Linie, an deren unterem Ende ein schwerer Punkt befestigt ist. Annähernd kann ein feiner Faden mit unten angehängter kleiner Metallkugel als ein mathematisches Pendel betrachtet werden.

Wird ein solches Pendel (Fig. 169) aus seiner Gleichgewichtslage OA in die Lage OB gebracht und dann der Wirkung der Schwere überlassen, so wird dasselbe mit beschleunigter Bewegung in die Gleichgewichtslage OA zurückkehren; vermöge der erlangten Geschwindigkeit dort aber nicht in Ruhe bleiben, sondern mit verzögerter Bewegung sich aufwärts weiter bis nach B_1 bewegen. Dort mit der Geschwindigkeit Null angekommen, wird das Pendel zurückkehren,

wieder über A nach B gelangen und in dieser Weise fortfahren, hin- und hergehende Bewegungen um die Gleichgewichtslage O A auszuführen.

Man nennt die Bewegung des Pendels aus der Lage O B in die Lage O B_1 oder umgekehrt eine Schwingung; die dazu erforderliche Zeit die Schwingungszeit und den Winkel α den Ausschlagwinkel.

Fig. 169. Fig. 170.



Zerlegt man in dem Augenblick, wo der Ausschlagwinkel $= \varphi$ ist (Fig. 170), das Gewicht G der Kugel in zwei Seitenkräfte nach der Richtung M O und rechtwinklig dazu (also tangential), so wird erstere durch den Widerstand der festen Drehachse O aufgehoben, während die letztere die allein treibende Kraft für die Kugel bildet. Diese Kraft hat die Größe:

$$K = G \sin \varphi = m g \sin \varphi$$

Nach Fig. 170 ist:

$$\sin \varphi = \frac{x}{l}$$

also auch:

$$K = m g \frac{x}{l} = \frac{m g}{l} x$$

Die treibende Kraft ist also proportional der wagerechten Entfernung x von der Gleichgewichtslage O A.

Die Tangentialbeschleunigung wird nach der letzten Gleichung:

$$p = \frac{K}{m} = \frac{g}{l} x$$

welche für $x = 1$ den Wert annimmt:

$$p_1 = \frac{g}{l} \quad \text{. . . . . 188)}$$

Für kleine Ausschlagwinkel kann statt des von der Kugel in Wirklichkeit durchlaufenen Bogens M A genügend genau die Grundrißlänge x des Bogens

Danach verhalten sich die Schwingungszeiten zweier Pendel wie die Quadratwurzeln aus ihren Längen; oder: die Pendellängen verhalten sich wie die Quadrate der Schwingungszeiten.

Setzt man in Gl. 189) $t = 1$, so erhält man die Länge des Sekundenpendels:

$$l_s = \frac{g}{\pi^2} = \frac{9,81}{3,14^2} = 0,994 \text{ m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 191)$$

Die Gl. 189) kann ferner benutzt werden, um die Größe der Fallbeschleunigung für verschiedene Punkte der Erdoberfläche zu berechnen, wenn bei gegebener Pendellänge l die Schwingungszeit t unmittelbar beobachtet wurde. Es ist dann:

$$g = l \frac{\pi^2}{t^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 192)$$

Da das physische Pendel (Fig. 171) als schwerer Körper eine Gruppe von unendlich vielen unveränderlich miteinander verbundenen Massenpunkten bildet, so ist dasselbe anzusehen als bestehend aus unendlich vielen einfachen Pendeln von ungleicher Länge. Die der Drehachse O näher liegenden Punkte haben das Bestreben, schneller zu schwingen als die entfernteren. Da aber sämtliche Punkte vermöge ihres Zusammenhanges gleichzeitig schwingen müssen, so werden die näher liegenden durch die entfernteren in ihrer Bewegung verzögert; während umgekehrt die entfernteren durch die näher liegenden in ihrer Bewegung beschleunigt werden. Es muß daher zwischen ihnen irgend einen Punkt O_1 geben, welcher weder eine Beschleunigung noch eine Verzögerung erfährt, und welcher gerade so schwingt, als ob er der einzige schwere Punkt des Pendels wäre, also genau so wie ein mathematisches Pendel von der Länge $O O_1$.

Fig. 171.



Man nennt den Punkt O_1 den Schwingungsmittelpunkt; die Länge $O O_1$ die Schwingungslänge des physischen Pendels.

Der Schwingungsmittelpunkt hat die wichtige Eigenschaft, daß er mit dem Drehpunkte vertauscht werden kann, ohne daß dadurch die Schwingungszeit des Pendels sich ändert. Man kann diese Eigenschaft dazu benutzen, die Länge $O O_1$ auf dem Wege des Versuches zu bestimmen, indem man bei einem Pendel mit einer festen und einer verstellbaren Drehachse die letztere so lange verschiebt, bis das an dieser Achse aufgehängte Pendel in einer bestimmten Zeit die nämliche Anzahl Schwingungen macht, als wenn es um die feste Achse schwingt. Ein so eingerichtetes Pendel wird Umkehrungspendel (Reversionspendel) genannt.

Die Schwingungslänge des physischen Pendels kann auch annähernd dadurch gefunden werden, daß man die Schwingungszeit t desselben beobachtet und die Länge des mathematischen Pendels von der gleichen Schwingungszeit nach Gl. 189) berechnet. Es ist dann:

gesetzt werden, und sind alsdann die Entwickelungen des § 23 ohne weiteres auf den vorliegenden Fall anzuwenden.

Durch Einsetzung des in Gl. 188) gefundenen Wertes von p_1 in die Gl. 187) ergibt sich danach für kleine Ausschlagwinkel die Schwingungszeit des Pendels annähernd zu:*)

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 189)$$

worin l die Pendellänge vom Aufhängepunkte des Fadens bis zum Schwerpunkt der Kugel bezeichnet.

Es darf unter der Annahme kleiner Ausschlagwinkel (bis etwa 5°) nach Gl. 189) die Schwingungszeit eines Pendels als unabhängig vom Ausschlagwinkel angenommen werden. Danach wird z. B. ein Pendel bei einem Ausschlagwinkel von 2° in einer bestimmten Zeit ebensoviele Schwingungen machen als bei einem Ausschlagwinkel von 4°. Man findet daher auf dem Wege des Versuches die Schwingungszeit t eines Pendels, wenn man bei kleinem Ausschlagwinkel die Anzahl n der Schwingungen während einer längeren Zeit T beobachtet, zu:

$$t = \frac{T}{n}$$

Wenn z. B. ein Pendel in 5 min. 450 Schwingungen macht, so ist die Dauer einer Schwingung:

$$t = \frac{5 \cdot 60}{450} = \frac{2}{3} \text{ sec.}$$

Aus Gl. 189) folgt, daß die Schwingungszeit des Pendels unabhängig ist vom Gewichte der Kugel. Zwei gleich lange Pendel, z. B. das eine mit Bleikugel, das andere mit Holzkugel, machen in gleichen Zeiten die gleiche Anzahl von Schwingungen.

Für zwei Pendel, das eine von der Länge l_1, das andere von der Länge l_2, sind nach Gl. 189) die Schwingungszeiten

für das erste Pendel: $t_1 = \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}$

„ „ zweite „ : $t_2 = \pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}$

Durch Division beider Ausdrücke ergibt sich:

$$t_1 : t_2 = \sqrt{l_1} : \sqrt{l_2} \text{ oder: } l_1 : l_2 = t_1^2 : t_2^2 \quad \ldots\ldots \quad 190)$$

*) Die genaue Formel bei dem Ausschlagwinkel φ ist:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \sin^6 \frac{\varphi}{2} + \ldots \right]$$

Danach verhalten sich die Schwingungszeiten zweier Pendel wie die Quadratwurzeln aus ihren Längen; oder: die Pendellängen verhalten sich wie die Quadrate der Schwingungszeiten.

Setzt man in Gl. 189) $t = 1$, so erhält man die Länge des Sekundenpendels:

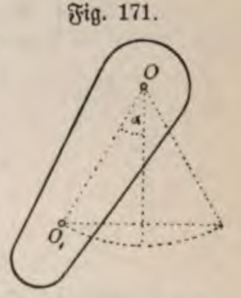
$$l_s = \frac{g}{\pi^2} = \frac{9,81}{3,14^2} = 0,994 \text{ m} \quad \ldots\ldots \quad 191)$$

Die Gl. 189) kann ferner benutzt werden, um die Größe der Fallbeschleunigung für verschiedene Punkte der Erdoberfläche zu berechnen, wenn bei gegebener Pendellänge l die Schwingungszeit t unmittelbar beobachtet wurde. Es ist dann:

$$g = l \frac{\pi^2}{t^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 192)$$

Da das physische Pendel (Fig. 171) als schwerer Körper eine Gruppe von unendlich vielen unveränderlich miteinander verbundenen Massenpunkten bildet, so ist dasselbe anzusehen als bestehend aus unendlich vielen einfachen Pendeln von ungleicher Länge. Die der Drehachse O näher liegenden Punkte haben das Bestreben, schneller zu schwingen als die entfernteren. Da aber sämtliche Punkte vermöge ihres Zusammenhanges gleichzeitig schwingen müssen, so werden die näher liegenden durch die entfernteren in ihrer Bewegung verzögert; während umgekehrt die entfernteren durch die näher liegenden in ihrer Bewegung beschleunigt werden. Es muß daher zwischen ihnen irgend einen Punkt O_1 geben, welcher weder eine Beschleunigung noch eine Verzögerung erfährt, und welcher gerade so schwingt, als ob er der einzige schwere Punkt des Pendels wäre, also genau so wie ein mathematisches Pendel von der Länge OO_1.

Fig. 171.



Man nennt den Punkt O_1 den Schwingungsmittelpunkt; die Länge OO_1 die Schwingungslänge des physischen Pendels.

Der Schwingungsmittelpunkt hat die wichtige Eigenschaft, daß er mit dem Drehpunkte vertauscht werden kann, ohne daß dadurch die Schwingungszeit des Pendels sich ändert. Man kann diese Eigenschaft dazu benutzen, die Länge OO_1 auf dem Wege des Versuches zu bestimmen, indem man bei einem Pendel mit einer festen und einer verstellbaren Drehachse die letztere so lange verschiebt, bis das an dieser Achse aufgehängte Pendel in einer bestimmten Zeit die nämliche Anzahl Schwingungen macht, als wenn es um die feste Achse schwingt. Ein so eingerichtetes Pendel wird Umkehrungspendel (Reversionspendel) genannt.

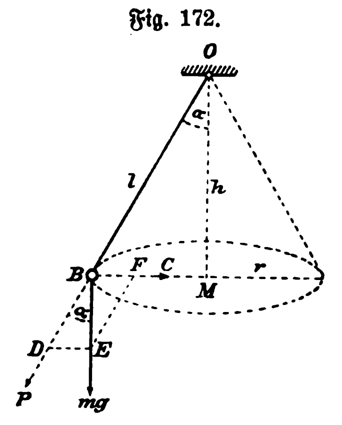
Die Schwingungslänge des physischen Pendels kann auch annähernd dadurch gefunden werden, daß man die Schwingungszeit t desselben beobachtet und die Länge des mathematischen Pendels von der gleichen Schwingungszeit nach Gl. 189) berechnet. Es ist dann:

$$OO_1 = l = \frac{g t^2}{\pi^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 193)$$

Läßt man ein einfaches Pendel nicht in der senkrechten Ebene schwingen, sondern erteilt demselben, nachdem es aus der Gleichgewichtslage in die Lage OB (Fig. 172) gebracht ist, rechtwinklig zu der Ebene BOM (etwa durch Stoß) eine solche Geschwindigkeit v, daß die Kugel eine wagerechte Kreislinie vom Halbmesser r gleichförmig durchläuft, der Faden also eine Kegelfläche beschreibt, so nennt man ein solches Pendel ein Zentrifugal- oder Kegelpendel.

Die auf die Kugel von der Masse m wirkende Schwerkraft mg zerlegt sich in die Seitenkräfte P = BD und C = BF (= DE). Erstere erscheint als Spannung des Fadens und wird durch den Widerstand des Aufhängepunktes O aufgehoben; während C diejenige Kraft ist, welche die Kugel zu der Kreisbewegung zwingt, also stets durch den Mittelpunkt M der Kreislinie hindurchgehen und nach Gl. 179) S. 136 die Größe haben muß:

Fig. 172.



$$C = \frac{m v^2}{r}$$

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke BDE und OBM folgt:

$$DE : BE = BM : OM$$

oder:

$$\frac{m v^2}{r} : mg = r : h$$

Daraus ergibt sich die Geschwindigkeit:

$$v = r \sqrt{\frac{g}{h}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 194)$$

Die Zeit eines Umlaufs ist:

$$t = \frac{2 r \pi}{v}$$

oder, wenn für v der Wert aus Gleichung 194) eingesetzt wird:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 195)$$

Für die Spannung P des Fadens erhält man:

$$P = \sqrt{(mg)^2 + \left(\frac{m v^2}{r}\right)^2} = mg \sqrt{1 + \left(\frac{v^2}{rg}\right)^2} \quad \ldots \quad 196)$$

Nach den Gleichungen 194) und 195) sind die Größen v und t unabhängig vom Gewichte der Kugel, dagegen abhängig von h; je kleiner h wird,

desto größer wird die Geschwindigkeit v und desto kleiner die Umlaufszeit t. Für h = Null wird v = ∞ und t = Null; d. h. die von dem Faden beschriebene Kegelfläche kann niemals in eine Ebene übergehen.

Für kleine Ausschlagwinkel α kann man genügend genau h mit der Fadenlänge l vertauschen und erhält dann statt Gl. 195):

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

In diesem Falle ist also die Umlaufszeit des Kegelpendels doppelt so groß als die Schwingungszeit eines einfachen, in einer senkrechten Ebene schwingenden Pendels von gleicher Länge.

Aufgabe 93. Wie groß ist die Schwingungszeit eines Pendels von 80 cm Länge? (g = 9,81 m.)

Auflösung. Nach Gl. 189) S. 142 ist:

$$t = \pi \sqrt{\frac{0,8}{9,81}} = 0,9 \text{ sec.}$$

Aufgabe 94. Ein Pendel von 1,5 m Länge macht an einem bestimmten Orte in 5 min. 244 Schwingungen. Wie groß ist die Fallbeschleunigung g an diesem Orte?

Auflösung. Die Zeit einer Schwingung ist:

$$t = \frac{5 \,.\, 60}{244} = 1.23 \text{ sec.}$$

Folglich nach Gl. 192) S. 143:

$$g = \frac{1,5 \,.\, 3,14^2}{1,23^2} = 9,79 \text{ m}$$

Aufgabe 95. Wie groß ist die Schwingungslänge eines physischen Pendels, dessen Schwingungszeit 0,5 sec. beträgt?

Auflösung. Nach Gl. 193) S. 144 ist:

$$l = \frac{9,81 \,.\, 0,5^2}{3,14^2} = 0,248 \text{ m}$$

Aufgabe 96. Bei einem Kegelpendel (Fig. 172) sei h = 4 m; r = 2 m; das Gewicht der Kugel G = m g = 8 kg. Es sollen die Größen v, t, P berechnet werden.

Auflösung. Nach Gl. 194) ist:

$$v = 2 \sqrt{\frac{9,81}{4}} = 3,132 \text{ m}$$

Nach Gl. 195) ist:

$$t = 2 \,.\, 3,14 \sqrt{\frac{4}{9,81}} = 4 \text{ sec.}$$

Nach Gl. 196) ist:

$$P = 8 \sqrt{1 + \left(\frac{3,132^2}{2 \,.\, 9,81}\right)^2} = 8,94 \text{ kg}$$

§ 25.

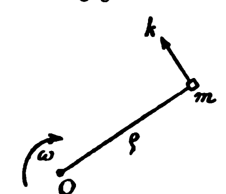
Trägheitsmoment.

Bei einem Körper, welcher eine fortschreitende Bewegung ausführt, haben die sämtlichen Punkte stets gleiche Geschwindigkeiten. Führt der Körper dagegen eine Drehbewegung um eine mit ihm fest verbundene Achse O aus, so sind die Geschwindigkeiten seiner einzelnen Punkte abhängig von deren Entfernung von der Drehachse.

Der sich drehende Körper würde nach dem Gesetze der Trägheit seine Bewegung unverändert fortsetzen; es ist daher ein der Drehrichtung entgegenwirkendes Kraftmoment erforderlich, welches während einer gewissen Zeit t wirksam sein muß, um den Körper zur Ruhe zu bringen. Unter dem Einflusse dieses Momentes führt der Körper während der Zeit t eine gleichförmig verzögerte Bewegung aus.

Wird die Geschwindigkeit der Drehbewegung (die Winkelgeschwindigkeit) mit ω bezeichnet, so hat zu Anfang der Zeit t ein in der Entfernung ϱ von der Drehachse befindliches Massenteilchen (Fig. 173) nach Gl. 181) S. 137 die Geschwindigkeit:

Fig. 173.



$$v = \varrho \omega$$

Die Verzögerung desselben während der Zeit t ist daher nach Gl. 9) S. 7:

$$p = \frac{\varrho \omega}{t}.$$

Folglich nach Gl. 13) S. 15 die auf das Massenteilchen wirkende verzögernde Kraft:

$$k = \frac{m \varrho \omega}{t}$$

Das statische Moment dieser Kraft in bezug auf die Achse O (Fig. 173) ist:

$$k \varrho = \frac{m \varrho^2 \omega}{t}$$

Ebensogroß würde das statische Moment einer Kraft k_1 sein müssen, welche, am Hebelarme 1 wirkend, dem Massenteilchen die gleiche Verzögerung erteilen würde als die Kraft k am Hebelarme ϱ; daher:

$$k_1 = \frac{m \varrho^2 \omega}{t}$$

Da dieselbe Betrachtung für alle übrigen Massenteilchen des Körpers gilt, so gibt die Summe:

$$K_1 = \Sigma \left(\frac{m \varrho^2 \omega}{t} \right)$$

oder, da $\frac{\omega}{t}$ als gemeinsame unveränderliche Größe vor das Summenzeichen gesetzt werden kann:

$$K_1 = \frac{\omega}{t} \Sigma (m \varrho^2)$$

die Größe derjenigen Kraft an, welche, am Hebelarme 1 wirkend, den sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω drehenden Körper in der Zeit t zur Ruhe bringen würde.

Die Größe $\frac{\omega}{t}$ in der letzten Gleichung ist die Verzögerung der in der Entfernung 1 von der Drehachse befindlichen Massenteilchen. Es gibt daher die Summe $\Sigma (m \varrho^2)$ die Größe einer Masse an, welche, wenn sie zu einem dünnen Ringe mit dem Halbmesser 1 verdichtet wäre, dieselbe verzögernde Kraft K_1 erfordern würde, um ihre Bewegung in der Zeit t zu vernichten als die Masse des Körpers selbst.

Der Ausdruck $\Sigma (m \varrho^2)$, d. i. die Summe aller Massenteilchen, multipliziert mit dem Quadrate ihrer Abstände von der Drehachse, wird das Trägheitsmoment des Körpers in bezug auf die Drehachse genannt und allgemein mit J bezeichnet; also:

$$J = \Sigma (m \varrho^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 197)$$

Nach der obigen Herleitung könnte man das Trägheitsmoment erklären als die auf den Hebelarm 1 bezogene Masse des Körpers, obgleich das Trägheitsmoment in Wirklichkeit keine Masse ist und nur als Bezeichnung für den Ausdruck $\Sigma (m \varrho^2)$ eingeführt wird.

Haben sämtliche Massenteilchen des Körpers die gleiche Entfernung von der Drehachse, so kann man in Gl. 197) die Größe ϱ^2 vor das Summenzeichen setzen und erhält:

$$J = \varrho^2 \Sigma (m)$$

oder, wenn $\Sigma (m)$ als ganze Masse des Körpers mit μ bezeichnet wird:

$$J = \varrho^2 \mu \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 198)$$

Das Trägheitsmoment eines Körpers kann danach ausgedrückt werden durch das Trägheitsmoment eines Ringes oder Hohlzylinders von sehr kleiner Wandstärke, dessen Mittelpunkt die Drehachse des Körpers bildet, dessen Halbmesser $= \varrho$ und dessen Masse $= \mu$ ist.

Man nennt μ die auf den Halbmesser ϱ bezogene Masse des Körpers. Da für einen bestimmten Körper und für eine bestimmte Drehachse das Trägheitsmoment J eine unveränderliche Größe ist, so fällt nach Gl. 198) μ um so größer aus, je kleiner ϱ wird, und umgekehrt. Derjenige Wert von ϱ, bei welchem die gedachte Masse μ gleich der wirklichen Masse des Körpers ist, heißt der Trägheitshalbmesser.

Der Begriff des Trägheitsmomentes läßt sich auch auf Flächen ausdehnen, indem man die Fläche als gleichförmig mit Masse versehen ansieht, also als eine unendlich dünne Platte auffaßt. Setzt man daher in Gl. 197) statt der

Massenteilchen m die diesen proportionalen Flächenteilchen f, und bezeichnet man den Abstand jedes einzelnen Flächenteilchens von der Achse mit y, so erhält man als Trägheitsmoment einer Fläche den Ausdruck:

$$J = \Sigma(fy^2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 199)$$

d. h.: Das Trägheitsmoment einer Fläche in bezug auf eine bestimmte Achse ist gleich der Summe aller Flächenteilchen, multipliziert mit dem Quadrate ihrer Abstände von dieser Achse.

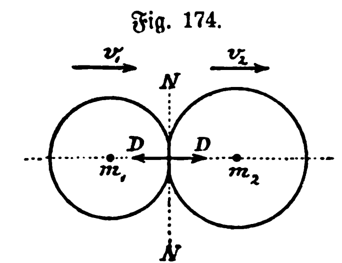
Die Trägheitsmomente der wichtigsten Querschnittsflächen sind in des Verfassers „Festigkeitslehre" aufgeführt.*)

§ 26.

Stoß der Körper.

Wenn ein bewegter Körper mit einem andern bewegten oder ruhenden Körper zusammentrifft, so entsteht ein Stoß. Bewegen sich die Schwerpunkte der als gleichartig (homogen) vorausgesetzten Körper vor dem Stoße in einer geraden Linie, welche rechtwinklig auf der Berührungsfläche NN steht (Fig. 174) und durch den Schwerpunkt dieser Berührungsfläche hindurchgeht, so heißt der Stoß gerade und zentral im Gegensatze zu dem schiefen und dem exzentrischen Stoße.

Fig. 174.



Bei dem geraden, zentralen Stoße treten nur Änderungen in der fortschreitenden Bewegung der Körper auf, und letztere bewegen sich nach dem Stoß in derselben Geraden wie vor dem Stoße. Dagegen hat der schiefe Stoß neben Geschwindigkeitsänderungen auch Richtungsveränderungen; der exzentrische Stoß noch Drehbewegung zur Folge.

Wir beschränken uns hier auf die Besprechung des zentralen Stoßes und zwar für vollkommen unelastische und für vollkommen elastische Körper. Wenn es auch streng genommen in der Natur solche Körper nicht gibt, so kommen doch Körper vor, welche sehr elastisch (Elfenbein) oder sehr unelastisch (feuchter Ton) sind.

1. Gerader, zentraler Stoß vollkommen unelastischer Körper.

Es seien m_1 und m_2 die Massen zweier Körper, welche sich mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 in derselben Geraden und in derselben Richtung bewegen. Ist die Geschwindigkeit v_2 der vorangehenden Masse m_2 kleiner als die Geschwindigkeit v_1 der ihr folgenden Masse m_1, so werden beide Körper in

*) Siehe: Lauenstein, Festigkeitslehre. 9. Aufl. § 5. S. 18.

irgend einem Zeitpunkte zusammenstoßen. Dadurch entstehen an der Berührungsfläche die einander gleichen, aber entgegengesetzten Druckkräfte D (Fig. 174), durch welche die Geschwindigkeit der Masse m_1 verkleinert, die der Masse m_2 aber vergrößert wird, bis beide Massen sich mit der gleichen Geschwindigkeit u fortbewegen. Die während des Stoßes erfolgende Geschwindigkeitsabnahme der Masse m_1 ist daher $= v_1 - u$; die Geschwindigkeitszunahme der Masse m_2 ist $= u - v_2$.

Bezeichnet man die Zeitdauer des Stoßes mit t, so sind $\frac{v_1 - u}{t}$ und $\frac{u - v_2}{t}$ die durch die Kräfte D und in der Richtung derselben erzeugten Beschleunigungen der Massen m_1 bezw. m_2.

Da sich nun nach § 4 S. 14 die Massen umgekehrt verhalten wie die Beschleunigungen, welche gleiche Kräfte ihnen erteilen, so ist:

$$m_1 : m_2 = \frac{u - v_2}{t} : \frac{v_1 - u}{t}$$

oder:

$$m_1 (v_1 - u) = m_2 (u - v_2)$$

Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeit u nach dem Stoße:

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 200)$$

Bewegen sich die Körper nicht hintereinander her, sondern gegeneinander, so ändert v_2 sein Vorzeichen, und man erhält dann:

$$u = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 201)$$

Die vor dem Stoße vorhandene gesamte Arbeitsgröße (die lebendige Kraft der beiden Massen) ist:

$$\mathfrak{A} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 202)$$

Die Arbeitsgröße nach dem Stoße, wo beide Massen sich mit der gemeinschaftlichen Geschwindigkeit u fortbewegen, ist:

$$\mathfrak{A}_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot u^2$$

oder, wenn für u der Wert aus den Gleichungen 200) bezw. 201) eingesetzt wird:

$$\mathfrak{A}_1 = \frac{(m_1 v_1 \pm m_2 v_2)^2}{2 (m_1 + m_2)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 203)$$

Der Unterschied $\mathfrak{A}_2 = \mathfrak{A} - \mathfrak{A}_1$ bezeichnet diejenige Arbeitsgröße, welche für die fortschreitende Bewegung verloren geht und aufgewandt wird zur Zu-

sammendrückung (Deformation) der Körper. Durch Subtraktion der Gleichungen 202) und 203) ergibt sich:

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 \mp v_2)^2 \quad \ldots\ldots \quad 204)$$

Die oberen Zeichen in den Gleichungen 203) und 204) gelten für die gleiche, die unteren Zeichen für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung der Körper.

Ist die Masse m_2 vor dem Stoße in Ruhe, also $v_2 =$ Null, und bezeichnet man die Geschwindigkeit der stoßenden Masse dann mit v, so ergeben sich aus den Gleichungen 200) bis 204) die folgenden:

Geschwindigkeit nach dem Stoße:

$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v \quad \ldots\ldots\ldots \quad 205)$$

Gesamtarbeit vor dem Stoße:

$$\mathfrak{A} = \frac{m_1 v^2}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 206)$$

Bewegungsarbeit nach dem Stoße:

$$\mathfrak{A}_1 = \frac{m_1^2 v^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{m_1 v^2}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \right) \quad \ldots \quad 207)$$

Formänderungsarbeit:

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{m_1 m_2 v^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{m_1 v^2}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \right) \quad \ldots \quad 208)$$

In allen Fällen, wo der Stoß zur Bewegungserzeugung benutzt wird, wie z. B. beim Einrammen von Pfählen, beim Einschlagen eines Nagels oder Keiles usw., ist $\mathfrak{A}_1$ nützliche Arbeit, die nach Gl. 207) um so größer ausfällt, je kleiner das Verhältnis $\frac{m_2}{m_1}$ ist; d. h. je kleiner die gestoßene Masse im Verhältnis zur stoßenden ist. Es ist hier also vorteilhaft, die stoßende Masse möglichst groß, die gestoßene Masse möglichst klein zu machen.

Umgekehrt gibt es Fälle, bei denen die Formänderungsarbeit als nützliche Arbeit erscheint, wie z. B. beim Schmieden; man wird dann, um diese möglichst groß zu erhalten, nach Gl. 208) die stoßende Masse (den Hammer) klein, die gestoßene Masse (den Amboß) groß wählen müssen.

2. Gerader, zentraler Stoß vollkommen elastischer Körper.

Der Stoß elastischer Körper erfolgt in zwei Zeitabschnitten. In dem ersten Abschnitt findet eine Zusammendrückung statt, wie bei dem Stoße unelastischer Körper; in dem zweiten Zeitabschnitt nehmen die Körper vermöge ihrer Elastizität ihre ursprüngliche Form wieder an.

Ist u die am Ende der ersten Stoßdauer erlangte gemeinschaftliche Geschwindigkeit der Massen m_1 und m_2, die sich mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 hintereinander her bewegen, so ist $(v_1 - u)$ die Geschwindigkeitsabnahme der hinteren Masse m_1 und $(u - v_2)$ die Geschwindigkeitszunahme der vorderen Masse m_2 während der ersten Stoßdauer. Es ergibt sich deshalb wie bei dem unelastischen Stoße (Gl. 200):

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

In dem Augenblicke, wo die erste Stoßdauer ihr Ende erreicht hat, ist die größte Zusammendrückung der Massen erfolgt, und es beginnen dann die zusammengedrückten Teile wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren. Dabei verliert die Masse m_1 nochmals die Geschwindigkeit $(v_1 - u)$, während die Geschwindigkeitszunahme der Masse m_2 wieder wie in der ersten Stoßdauer $(u - v_2)$ beträgt. Der ganze Geschwindigkeitsverlust der Masse m_1 ist danach $= 2(v_1 - u)$; der gesamte Geschwindigkeitszuwachs der Masse m_2 ist $= 2(u - v_2)$.

Bezeichnet man die Geschwindigkeiten der Massen m_1 und m_2 am Ende des Stoßes mit c_1 und c_2, so ist danach:

$$c_1 = v_1 - 2\,(v_1 - u) = 2\,u - v_1$$
$$c_2 = v_2 + 2\,(u - v_2) = 2\,u - v_2$$

oder, wenn für u der obige Wert eingesetzt wird:

$$\left.\begin{aligned} c_1 &= \frac{2\,m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \\ c_2 &= \frac{2\,m_1 v_1 - v_2 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 209)$$

Bewegen sich die Körper vor dem Stoße nach *entgegengesetzten* Richtungen, so ist in die Gleichungen 209) $- v_2$ für v_2 einzusetzen.

Für $m_1 = m_2$ folgt aus den Gleichungen 209):

$$c_1 = v_2 \text{ und } c_2 = v_1$$

d. h. *gleiche Massen vertauschen durch den Stoß ihre Geschwindigkeiten.* Bewegten sich die Körper vor dem Stoße in *derselben* Richtung, so behalten sie auch nach dem Stoße diese Richtung bei. War vor dem Stoße die Bewegung der Körper *entgegengesetzt*, so bleibt sie auch nach dem Stoße entgegengesetzt gerichtet; jeder Körper wird dann von der Stelle des Zusammenstoßes mit derjenigen Geschwindigkeit wieder zurückkehren, welche vor dem Stoße der andere Körper hatte.

Ist die gestoßene Masse *in Ruhe*, so ergibt sich aus den Gleichungen 209), indem man $v_2 =$ Null und $v_1 = v$ setzt:

$$c_1 = \frac{v\,(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \qquad c_2 = \frac{2\,m_1 v}{m_1 + m_2} \quad \ldots \quad 210)$$

Für $m_1 = m_2$ folgt daraus:

$$c_1 = 0 \qquad c_2 = v \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 211)$$

d. h. Stößt eine Masse mit der Geschwindigkeit v auf eine gleich große ruhende Masse, so kommt die stoßende Masse zur Ruhe und die gestoßene nimmt die Geschwindigkeit der stoßenden an.

Ist das Verhältnis $\frac{m_1}{m_2}$ = Null, d. h. stößt eine sehr kleine Masse mit der Geschwindigkeit v gegen eine sehr große ruhende Masse (z. B. gegen eine feste Wand), so wird nach den Gleichungen 210):

$$c_1 = -v \qquad c_2 = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 212)$$

d. h. die stoßende Masse prallt mit der Geschwindigkeit v von der gestoßenen Masse zurück; letztere bleibt in Ruhe.

Bei den vollkommen elastischen Körpern tritt durch den Stoß kein Arbeitsverlust ein; denn die Summe der lebendigen Kräfte der Körper vor und nach dem Stoße ist die gleiche. Es ist also:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 c_1^2}{2} + \frac{m_2 c_2^2}{2}$$

was sich leicht nachweisen läßt, indem man für c_1 und c_2 die in den Gleichungen 209) angegebenen Werte einsetzt.

In der ersten Hälfte des Stoßes findet dagegen für die Bewegung ein Verlust an lebendiger Kraft statt, welcher angewandt wird zur Zusammendrückung der aufeinandertreffenden Körper selbst oder der an ihnen angebrachten besonderen Stoßapparate, z. B. der Puffer bei Eisenbahnwagen.

Dieser Arbeitsverlust ist gleich der Formänderungsarbeit beim unelastischen Stoße; hat also, wenn die gestoßene Masse m_2 vorher in Ruhe war, nach Gl. 208) die Größe:

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{m_1 v^2}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 213)$$

Sind die Massen einander gleich ($m_1 = m_2 = m$), so wird:

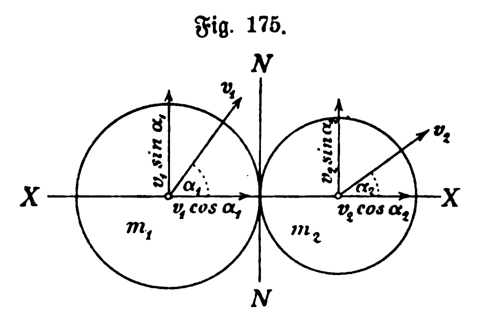
$$\mathfrak{A}_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m v^2}{2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 214)$$

3. Schiefer, zentraler Stoß.

Bewegen sich die Schwerpunkte der beiden Körper vor dem Stoße nicht in der Geraden XX, welche rechtwinklig auf der Berührungsfläche NN steht, und schließen die Bewegungsrichtungen mit der XX die Winkel α_1 und α_2 ein (Fig. 175), so zerlege man die Geschwindigkeit v_1 in die Seitengeschwindig-

keiten $v_1 \sin \alpha_1$ und $v_1 \cos \alpha_1$; ebenso die Geschwindigkeit v_2 in $v_2 \sin \alpha_2$ und $v_2 \cos \alpha_2$.

Fig. 175.



Die parallel zu der Berührungsfläche NN gerichteten Seitengeschwindigkeiten $v_1 \sin \alpha_1$ und $v_2 \sin \alpha_2$ bleiben, wenn von der Reibung abgesehen wird, durch den Stoß unverändert.

Die in die Richtung XX fallenden Seitengeschwindigkeiten $v_1 \cos \alpha_1$ und $v_2 \cos \alpha_2$ ändern sich nach den Regeln des geraden zentralen Stoßes.

Für vollkommen unelastische Körper ergibt sich die nach dem Stoße erlangte gemeinsame Geschwindigkeit u in der Richtung XX nach den Gleichungen 200) und 201) zu:

$$u = \frac{m_1 v_1 \cos \alpha_1 \pm m_2 v_2 \cos \alpha_2}{m_1 + m_2}.$$

Durch Zusammensetzung von u mit $v_1 \sin \alpha_1$ bezw. $v_2 \sin \alpha_2$ erhält man die wirklichen Geschwindigkeiten nach dem Stoße.

Für vollkommen elastische Körper werden die Geschwindigkeiten nach dem Stoße in der Richtung XX nach Gl. 209):

$$c_1 = \frac{\pm 2 m_2 v_2 \cos \alpha_2 + v_1 \cos \alpha_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$$

$$c_2 = \frac{2 m_1 v_1 \cos \alpha_1 \mp v_2 \cos \alpha_2 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$$

die ebenfalls wieder mit $v_1 \sin \alpha_1$ bezw. $v_2 \sin \alpha_2$ zusammenzusetzen sind, um die nach dem Stoße erlangten wirklichen Geschwindigkeiten zu erhalten.

Aufgabe 97. Ein unelastischer 2,94 kg schwerer Körper bewegt sich mit einer Geschwindigkeit $v_2 = 4$ m und wird von einem anderen unelastischen 1,96 kg schweren Körper, welcher sich mit der Geschwindigkeit $v_1 = 9$ m in derselben Richtung bewegt, gestoßen. Wie groß ist die gemeinschaftliche Geschwindigkeit u nach dem Stoße?

Auflösung. Die Massen der beiden Körper sind:

$$m_2 = \frac{2{,}94}{9{,}81} = 0{,}3 \qquad m_1 = \frac{1{,}96}{9{,}81} = 0{,}2$$

Folglich nach Gl. 200):

$$u = \frac{0,2 \,.\, 9 + 0,3 \,.\, 4}{0,2 + 0,3} = 6 \text{ m}$$

Aufgabe 98. Wie groß wird u bei entgegengesetzt gerichteter Bewegung der beiden Körper?

Auflösung. Nach Gl. 201):

$$u = \frac{0,2 \,.\, 9 - 0,3 \,.\, 4}{0,2 + 0,3} = 1,2 \text{ m}$$

Die Bewegung erfolgt in der Richtung, die der Körper von der Masse m_1 vor dem Stoße hatte; denn $\frac{m_1 v_1^2}{2}$ ist größer als $\frac{m_2 v_2^2}{2}$

Aufgabe 99. Wenn in Aufgabe 97 der erste Körper vor dem Stoße in Ruhe war, wie groß wird dann die gemeinschaftliche Geschwindigkeit nach dem Stoße?

Auflösung. Nach Gl. 205):

$$u = \frac{0,2}{0,2 + 0,3} \cdot 9 = 3,6 \text{ m}$$

Aufgabe 100. Zwei elastische Körper, deren Massen $m_1 = 5$ und $m_2 = 3$ sind, stoßen mit den Geschwindigkeiten $v_1 = 5$ und $v_2 = 4$ m aufeinander. Wie groß sind ihre Geschwindigkeiten nach dem Stoße?

a) bei gleicher Richtung vor dem Stoße,
b) bei entgegengesetzter Richtung vor dem Stoße.

Auflösung. Für a) ist nach den Gleichungen 209):

$$c_1 = \frac{2 \,.\, 3 \,.\, 4 + 5\,(5 - 3)}{5 + 3} = 4,25 \text{ m}$$

$$c_2 = \frac{2 \,.\, 5 \,.\, 5 - 4\,(5 - 3)}{5 + 3} = 5,25 \text{ m}$$

für b) wird:

$$c_1 = \frac{-2 \,.\, 3 \,.\, 4 + 5\,(5 - 3)}{5 + 3} = -1,75 \text{ m}$$

$$c_2 = \frac{2 \,.\, 5 \,.\, 5 + 4\,(5 - 3)}{5 + 3} = 7,25 \text{ m}$$

Mit diesen Geschwindigkeiten werden sich beide Körper wieder voneinander entfernen.

Aufgabe 101. Vermittelst eines 1000 kg schweren Hammers wird ein glühendes Eisenstück auf einem Amboß ausgeschmiedet. Die Hubhöhe des Hammers beträgt h = 1,6 m; das Gewicht des Amboß samt dem darauf liegenden Schmiedestück sei = 9200 kg. Wie groß ist die Nutzarbeit, und wie groß die auf Einrammen des Amboß, auf Erschütterung der Gebäude-Fundamente usw. verwendete schädliche Arbeit?

Auflösung. Aus der Hubhöhe des Hammers ergibt sich nach Gl. 172) S. 132 die Endgeschwindigkeit v zu:

$$v = \sqrt{2 g h} = \sqrt{2 \,.\, 9,81 \,.\, 1,6} = 5,6 \text{ m}$$

Die lebendige Kraft des Hammers unmittelbar vor dem Stoße ist dann nach Gl. 206) S. 150:

$$\mathfrak{A} = \frac{1000}{9,81} \cdot \frac{5,6^2}{2} = \backsim 1600 \text{ mkg}$$

Da das Verhältnis der Massen gleich dem Verhältnis der Gewichte ist, so ergibt sich nach Gl. 207) die Bewegungsarbeit (schädliche Arbeit) zu:

$$\mathfrak{A}_1 = 1600 \left(\frac{1}{1 + \frac{9200}{1000}} \right) = 1600 \,.\, 0{,}098 = 157 \text{ mkg}$$

und nach Gl. 208) die Formänderungsarbeit (nützliche Arbeit) zu:

$$\mathfrak{A}_2 = 1600 \left(\frac{1}{1 + \frac{1000}{9200}} \right) = 1600 \,.\, 0{,}902 = 1443 \text{ mkg}$$

Der Arbeitsverlust beträgt also $\sim 10\,\%$.

Aufgabe 102. Der Bär einer Kunstramme sei 1000 kg schwer; die Hubhöhe desselben betrage 160 cm. Wenn die Eindringungstiefe s des 250 kg schweren Pfahles bei dem letzten Schlage des Bären 0,8 cm beträgt, wie groß ist dann der Widerstand W, welchen das Erdreich dem Eindringen des Pfahles entgegensetzt, oder die Tragfähigkeit des Pfahles?

Auflösung. Die mechanische Arbeit des Erdwiderstandes ist $= W s$. Diese ist nach Gl. 22) S. 25 gleichzusetzen dem auf Bewegungsarbeit verwendeten Teile der lebendigen Kraft des Bären (Gl. 207). Außerdem wird die nach dem Stoße von dem Gewichte G_1 des Bären und dem Gewichte G_2 des Pfahles verrichtete mechanische Arbeit $(G_1 + G_2) s$ zum Überwinden des Widerstandes W verwendet. Es ist daher:

$$W s = \frac{m_1 v^2}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \right) + (G_1 + G_2) s$$

$$W s = \frac{G_1}{g} \frac{2 g h}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{G_2}{G_1}} \right) + (G_1 + G_2) s$$

$$W s = \frac{G_1 h}{1 + \frac{G_2}{G_1}} + (G_1 + G_2) s$$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte ergibt sich:

$$W \,.\, 0{,}8 = \frac{1000 \,.\, 160}{1 + \frac{250}{1000}} + (1000 + 250)\, 0{,}8$$

oder:

$$W = 160\,000 + 1250 = 161\,250 \text{ kg}$$

Der Sicherheit wegen nimmt man jedoch die Belastung des Pfahles nur zu etwa $1/8$ des berechneten Wertes an; also:

$$W = \frac{161\,250}{8} = \sim 20\,000 \text{ kg.}$$

Abschnitt IV.

Die Lehre vom Gleichgewicht (Statik) tropfbar flüssiger Körper.

§ 27.

Unterschied zwischen festen und flüssigen, zwischen tropfbar flüssigen und gasförmigen Körpern.

Die flüssigen Körper unterscheiden sich von den festen hauptsächlich dadurch, daß sie weder einen Widerstand gegen Zerreißen noch gegen Abscherung besitzen, und daß der Reibungskoeffizient der Ruhe bei ihnen gleich Null ist. Ihre Grundeigenschaft ist die leichte Verschiebbarkeit ihrer Teilchen. Während aber die tropfbar flüssigen Körper einen gewissen Grad von Kohäsion haben, der sich in dem Bestreben, Tropfen zu bilden, äußert, haben die gasförmigen Flüssigkeiten vielmehr das Bestreben, sich immer mehr auszudehnen. Die abstoßenden Kräfte zwischen den einzelnen materiellen Punkten erreichen bei einer gasförmigen Flüssigkeit niemals die Größe Null, und diese kann sich nur dann im Gleichgewicht befinden, wenn sie ringsum von Gefäßwänden eingeschlossen ist.

Ein anderer, allerdings weniger wesentlicher Unterschied zwischen den tropfbar flüssigen und den gasförmig flüssigen Körpern besteht noch darin, daß letztere verhältnismäßig leicht in einen kleinen Raum zusammengedrückt werden können, während die ersteren sehr schwer zusammendrückbar sind. Zum Beispiel nimmt der Rauminhalt einer Wassermasse, auf welche von allen Seiten ein Druck von 1 kg auf das Quadratzentimeter ausgeübt wird, nur um $^1/_{20000}$ ab. Diese geringe Abnahme des Rauminhaltes kann in der Technik vernachlässigt werden; man darf daher die tropfbar flüssigen Körper als Körper von unveränderlichem Rauminhalt behandeln.

§ 28.

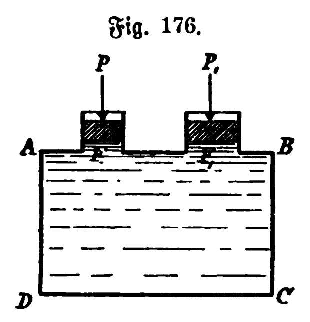
Wasserdruck ohne Berücksichtigung der Schwerkräfte. (Hydrostatischer Druck.)

Infolge der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen pflanzt sich der Druck, der auf irgend einen Teil der Oberfläche einer abgesperrten Flüssigkeit ausgeübt wird, durch die ganze Masse derselben gleichmäßig fort, so daß der Druck in allen Punkten der Oberfläche sowohl, wie im Innern

der Flüssigkeit und in allen Richtungen eine und dieselbe Größe hat (Gesetz des hydrostatischen Druckes).

Es sei ABCD (Fig. 176) ein Gefäß, in welchem eine Wassermasse eingeschlossen ist. Wird ein Teil der Gefäßwand durch einen beweglichen zylindrischen Kolben vom Querschnitt F ersetzt, und wirkt auf diesen von außen her eine Kraft P, so wird dadurch ein Druck p hervorgerufen, welcher sich auf die ganze Wandfläche des Gefäßes ausdehnt und für jede Flächeneinheit die Größe hat:

Fig. 176.



$$p = \frac{P}{F}$$

Es erleidet daher (abgesehen vom Gewichte des Wassers) jeder Teil der Gefäßwände, welcher $= F$ ist, denselben Druck $P = pF$; eine größere oder kleinere Fläche erleidet je nach Verhältnis ihrer Größe einen größeren oder kleineren Druck. Befindet sich daher an einer anderen Stelle des Gefäßes ein zweiter beweglicher zylindrischer Kolben vom Querschnitt F_1, so erhält dieser einen Druck $= pF_1$. Um ein Herausschieben desselben zu verhindern, muß auf ihn von außen her eine Kraft P_1 wirken von der Größe:

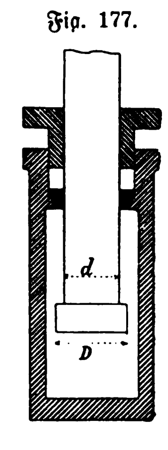
$$P_1 = pF_1 = P\frac{F_1}{F}$$

Daraus folgt:

$$\frac{P}{P_1} = \frac{F}{F_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 215)$$

Das Verhältnis der beiden Kräfte P und P_1 ist gleich dem Verhältnis der beiden Kolbenflächen. Die Gl. 215) bleibt auch noch richtig, wenn die Endflächen der Kolben eine beliebige krummlinige Form haben; man hat dann nur unter F bezw. F_1 die rechtwinklig zur Bewegungsrichtung der Kolben stehenden Querschnittsflächen der Öffnungen zu verstehen. Ebenso hat eine innere Verdickung des Kolbens (Fig. 177) keinen Einfluß, da die Drücke auf die Ringfläche $\frac{(D^2 - d^2)\pi}{4}$ sich gegenseitig aufheben.

Fig. 177.

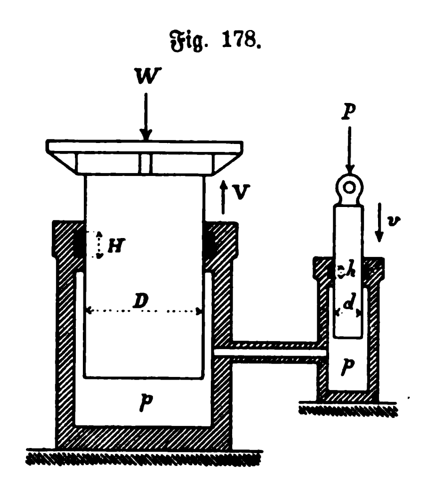


Auf dem Gesetze des hydrostatischen Druckes beruht die Wirkung der Wasserdruckpresse oder hydraulischen Presse (Fig. 178). Diese besteht im wesentlichen aus zwei mit Wasser (oder Öl) gefüllten und durch eine Röhre miteinander verbundenen Zylindern mit oben dicht schließenden beweglichen Kolben; einem größeren und einem kleineren.

Der Zweck der hydraulischen Presse ist, durch einen auf den kleinen Kolben ausgeübten äußeren Druck P einen auf den größeren Kolben wirkenden Widerstand W zu überwinden.

Sind D und d die Durchmesser der beiden Kolben, und ist p der im Innern der Flüssigkeit durch die äußeren Kräfte W und P erzeugte Druck auf die Flächeneinheit, so ist für den Fall des Gleichgewichtes, abgesehen von den Reibungswiderständen:

Fig. 178.



$$W = \frac{D^2 \pi}{4} p$$

$$P = \frac{d^2 \pi}{4} p$$

Folglich:

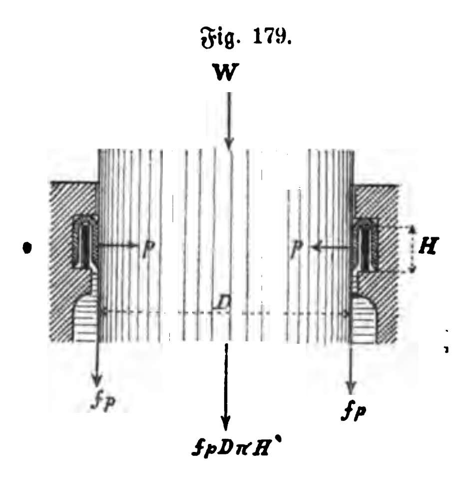
$$\frac{W}{P} = \frac{D^2}{d^2} \quad . \quad . \quad . \quad 216)$$

Da aus dem kleinen Zylinder durch den Kolben gerade so viel Wasser verdrängt wird, als in den großen Zylinder eintritt, so ist das Verhältnis der Kolbengeschwindigkeiten V und v gleich dem umgekehrten Verhältnisse der Kolbenquerschnitte; daher:

$$\frac{V}{v} = \frac{d^2}{D^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 217)$$

Die Dichtung zwischen Kolben und Zylinder wird gewöhnlich durch einen Lederstulp (Liderung) bewirkt, der durch den Wasserdruck selbst einerseits gegen den Kolben, andererseits gegen die innere Zylinderwand gepreßt wird (Fig. 179).

Fig. 179.



Mit Berücksichtigung der an den Liderungen auftretenden Reibungswiderstände erhält man, wenn f der Reibungskoeffizient ist und mit H und h die Höhen der Liderungen bezeichnet werden:

$$W = \frac{D^2 \pi}{4} p - f p D \pi H$$

$$P = \frac{d^2 \pi}{4} p + f p d \pi h$$

Folglich:

$$\frac{W}{P} = \frac{D^2}{d^2} \left(\frac{1 - 4f \frac{H}{D}}{1 + 4f \frac{h}{d}} \right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad 218)$$

Aus Gl. 217) und Gl. 218) ergibt sich danach das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{1 - 4f \frac{H}{D}}{1 + 4f \frac{h}{d}} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 219)$$

Aufgabe 103. Bei einer hydraulischen Presse sei:

$$d = 2 \text{ cm}; \; D = 40 \text{ cm}; \; f = 0{,}12; \; \frac{H}{D} = \frac{h}{d} = 0{,}2$$

Welcher Widerstand W kann durch eine auf den kleinen Kolben wirkende Kraft $P = 100$ kg überwunden werden?

Auflösung. Nach Gl. 219) ist das Güteverhältnis:

$$\eta = \frac{1 - 4 \,.\, 0{,}12 \,.\, 0{,}2}{1 + 4 \,.\, 0{,}12 \,.\, 0{,}2} = 0{,}825$$

Da nun:

$$\frac{D^2}{d^2} = \frac{40^2}{2^2} = 400$$

so wird nach Gl. 218):

$$W = 100 \,.\, 400 \,.\, 0{,}825 = 33000 \text{ kg}$$

Ohne Reibung würde nach Gl. 216) sein:

$$W = 100 \,.\, 400 = 40000 \text{ kg}$$

§ 29.

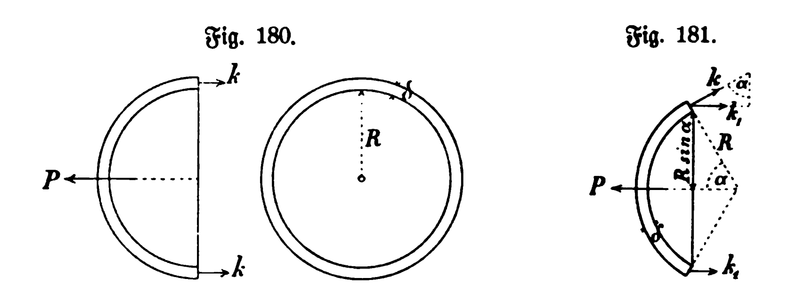
Wandstärke von Gefäßen und Rohren.

In einem hohlkugelförmigen Gefäße vom Halbmesser R und der Wandstärke δ (Fig. 180) herrsche der Druck p auf 1 qcm. Denkt man sich die Hohlkugel durch eine durch den Mittelpunkt gelegte Ebene in zwei gleiche

Teile zerlegt, so ist nach dem vorigen Paragraphen der gesamte Druck auf jede Hohlkugelhälfte:

$$P = R^2 \pi p$$

Fig. 180. Fig. 181.



Diesem Drucke halten die in der ringförmigen Schnittfläche auftretenden Spannkräfte das Gleichgewicht. Ist δ im Verhältnis zu R klein, so kann die Querschnittsfläche genügend genau $= 2 R \pi \delta$ gesetzt werden. Unter der Annahme, daß sich die Spannung k gleichmäßig über die Wanddicke δ verteilt, ist dann: *)

$$R^2 \pi p = 2 R \pi \delta k$$

Folglich:

$$\delta = \frac{R}{2} \frac{p}{k} \text{ **)} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 220)$$

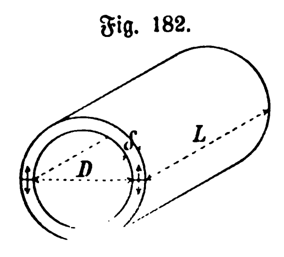
Für einen Abschnitt der Hohlkugel mit dem halben Zentriwinkel α (Fig. 181) ist in gleicher Weise:

$$(R \sin \alpha)^2 \pi p = 2 (R \sin \alpha) \pi \delta k_1$$

woraus sich, da $k_1 = k \sin \alpha$ ist, für δ ebenfalls der in Gl. 220) angeführte Wert ergibt.

Ein zylindrisches Rohr von der Länge L, dem inneren Durchmesser D und der Wandstärke δ (Fig. 182), dessen Enden auf irgend eine Weise geschlossen sind, kann durch den inneren Druck p auch in einer durch die Längsachse gelegten Ebene auseinander gesprengt werden. Der gesamte Druck ist in diesem Falle $= D L p$; der in Frage kommende Querschnitt $= 2 L \delta$; folglich:

Fig. 182.



$$D L p = 2 L \delta k$$

Daraus ergibt sich die Wandstärke zu:

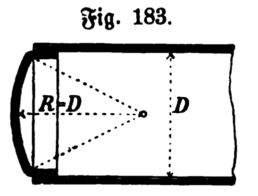
$$\delta = \frac{D}{2} \frac{p}{k} \quad \ldots \ldots \quad 221)$$

*) Vergl. Lauenstein, Festigkeitslehre, 9. Aufl (Gl. 1) S. 6.

**) Dieselbe Gleichung gilt auch für die Beanspruchung eines zylindrischen Rohres vom Halbmesser R in der Querrichtung.

Die Gleichungen 220) und 221) lassen erkennen, daß bei demselben Drucke p und derselben Beanspruchung k die Wandstärken δ einander gleich werden, wenn der Halbmesser R der Hohlkugel gleich dem Durchmesser D des zylindrischen Rohres ist. Soll daher ein Rohr durch einen kugelförmigen Boden abgeschlossen werden (wie z. B. bei einem einfachen zylindrischen Dampf- oder Wasserkessel), so muß, damit gleiche Sicherheit gegen Zerreißen vorhanden ist, der Halbmesser des Bodens gleich sein dem Durchmesser des Rohres (Fig. 183).

Fig. 183.



Die Gleichung 220) gilt gleichzeitig für die Beanspruchung eines zylindrischen Rohres in der Querrichtung. Aus beiden Gleichungen geht daher noch hervor, daß $\left(\text{da nun } R = \frac{D}{2}\right)$ die Beanspruchung eines Rohres in der Querrichtung nur halb so groß ist als diejenige in der Längsrichtung. Genietete Dampfkesselmäntel z. B. werden demnach in der Quer- oder Rundnaht auch eine schwächere Nietung erhalten können.

Die nach Gl. 221) berechnete Wandstärke eines Rohres ist die theoretische; genügt jedoch in der Praxis noch nicht, da in Wirklichkeit die Spannung sich nicht ganz gleichmäßig (in Richtung des Halbmessers) über den Querschnitt verteilt, und da oft das Material nicht überall gleich gut ist. Außerdem spielen, namentlich bei kleinen Werten von p und D, die Porosität des Materiales und die praktischen Rücksichten auf die Ausführung eine wesentliche Rolle. Man nimmt deshalb die auszuführende Wandstärke eines Rohres um ein durch Erfahrung festgestelltes, vom Materiale abhängiges Maß C größer an als nach Gl. 221) und setzt:

$$\delta = \frac{D}{2} \cdot \frac{p}{k} + C \quad \ldots\ldots\ldots \quad 222)$$

Für gußeiserne Rohre, die einen Betriebsüberdruck bis p = 8 Atm. (8 kg/qcm) auszuhalten haben, kann angenommen werden:

k = 200 kg; C = 0,9 cm für liegend gegossene Rohre
k = 240 „ ; C = 0,7 „ „ stehend „ „

Man erhält dann nach Gl. 222) als auszuführende Wandstärke für liegend gegossene Rohre:

$$\delta = \frac{D}{50} + 0{,}9 \text{ cm}$$

für stehend gegossene Rohre:

$$\delta = \frac{D}{60} + 0{,}7 \text{ cm} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 223)$$

Nach den Normalien zu Rohrleitungen für Dampf von hoher Spannung (aufgestellt vom Verein Deutscher Ingenieure,*) ist bei

*) Zeitschr. d. V. d. Ing. 1900 S. 1481. (Die Normalien gelten bis 20 Atm. Überdruck.)

p bis 8 Atm. Gußeisen zulässig für Rohre von allen Durchmessern; von 8 bis 13 Atm. nur zulässig für Rohre bis zu 15 cm Durchmesser; für $p > 13$ Atm. ist Gußeisen für Rohre überhaupt nicht mehr zulässig.

Bei anderen Materialien kann man folgende Werte annehmen:

$k = 350$; $C = 0,1$ für Schmiedeisen (Schweiß- und Flußeisen)
$k = 200$; $C = 0,15$ „ Kupfer (gezogen)
$k = 200$; $C = 0,6$ „ Messing (gegossen)
$k = 200$; $C = 0,2$ „ Messing (gezogen)
$k = 50$; $C = 0,1$ „ Blei

Bei sehr großer Wandstärke im Verhältnis zum lichten Durchmesser D trifft die Annahme der gleichmäßigen Spannungsverteilung nicht mehr zu, und dürfen derartige Rohre (wie z. B. Kanonenrohre) nicht nach Gl. 222) berechnet werden. Die Spannung an der Innenwandung ist bei solchen Rohren stets bedeutend größer als außen, und es würden unter Voraussetzung homogenen Materiales bei Überanstrengung sich zuerst Risse an der Innenseite zeigen. Diesem Übelstande kann dadurch vorgebeugt werden, daß man die Kanonenrohre aus einzelnen Teilen zusammensetzt und auf das innere durchgehende Kernrohr besondere Ringe mit Schrinkmaß warm aufzieht, so daß sie nach der erfolgten Abkühlung auf das Kernrohr einen von außen nach innen gerichteten Druck ausüben. (Nach diesem Grundgedanken werden z. B. die Kruppschen Ringkanonen ausgeführt.)

§ 30.

Einfluß der Schwerkräfte. Druck auf Gefäßwandungen.

Infolge der Schwere und der leichten Verschiebbarkeit der Teile ist die freie Oberfläche einer in einem offenen Gefäße befindlichen Flüssigkeit eine wagerechte Ebene; denn bei einer gegen die Wagerechte geneigten Oberfläche würden die obersten Teile sofort über die darunter liegenden wie über eine schiefe Ebene herabgleiten.

Der durch das Eigengewicht der Flüssigkeit hervorgebrachte Druck nimmt in senkrechter Richtung in demselben Verhältnis wie die Tiefe zu. In jeder der wagerechten Oberfläche parallelen Ebene herrscht also überall gleicher Druck. Bei Flüssigkeiten von verschiedenem Gewichte in einem Gefäße lagert sich stets die leichtere Flüssigkeit über der schwereren (z. B. Öl über Wasser).

Der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf den wagerechten Boden eines Gefäßes ausübt, ist gleich dem Gewichte einer senkrechten Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche der Boden und deren Höhe der Abstand des Bodens von der Oberfläche der Flüssigkeit ist.

Dabei ist es gleichgültig, ob der Querschnitt des Gefäßes von unten nach oben derselbe bleibt (Fig. 184) oder sich vergrößert (Fig. 185) oder sich verkleinert (Fig. 186). Bei Fig. 184 ist das Gewicht der Flüssigkeit gleich dem Bodendruck; bei Fig. 185 größer; bei Fig. 186 kleiner als der Bodendruck.

Ist F der Flächeninhalt des Bodens, h die Tiefe desselben unter der Oberfläche (die Druckhöhe) und γ das Gewicht der Kubikeinheit der Flüssigkeit, so ist der Bodendruck:

$$D = \gamma F h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 224)$$

Fig. 184. Fig. 185. Fig. 186.

Wie auf den Boden, so übt die Flüssigkeit auch auf die Seitenwände des Gefäßes einen Normaldruck aus. Dieser nimmt mit der Tiefe zu und ist für jedes Flächenteilchen f der Wand gleich einer Flüssigkeitssäule, welche das Flächenteilchen zur Grundfläche und den senkrechten Abstand desselben von der Oberfläche der Flüssigkeit (dem Flüssigkeitsspiegel) zur Höhe hat.

Bezeichnet man diesen Abstand mit x, so ist der Druck auf das Flächenteilchen $= f x \gamma$.

Der Gesamtdruck D auf die ganze Fläche ist daher:

$$D = \Sigma (f x \gamma) = \gamma \Sigma (f x)$$

Nach Gl. 35) S. 42 ist:

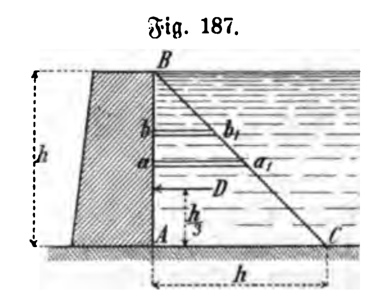
$$f_1 x_1 + f_2 x_2 + \ldots = \Sigma (f x) = F x_0$$

wo x_0 den Abstand des Schwerpunktes der gedrückten Fläche vom Flüssigkeitsspiegel bedeutet; also wird:

$$D = \gamma F x_0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 225)$$

d. h.: Der Druck der Flüssigkeit gegen eine ebene Fläche ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, deren Querschnitt gleich der gedrückten Fläche, und deren Höhe gleich dem Abstande des Schwerpunktes dieser Fläche vom Flüssigkeitsspiegel ist.

Fig. 187.



Der Angriffspunkt von D (d. i. der Mittelkraft sämtlicher auf die einzelnen Flächenteilchen wirkenden Druckkräfte) heißt der Mittelpunkt des Druckes. Derselbe liegt, da die Druckkräfte mit der Tiefe zunehmen, stets tiefer als der Schwerpunkt der gedrückten Fläche.

Denkt man sich über den einzelnen sehr

dünnen, wagerechten Flächenstreifen a, b, ... einer vom Wasser gedrückten senkrechten Wand $AB = h$ (Fig. 187), Wasserprismen aa_1, bb_1, ... rechtwinklig gegen die Wand errichtet, deren Höhe gleich dem Abstande der Streifen vom Wasserspiegel ist, so stellen die Gewichte dieser Prismen den Druck auf den betreffenden Flächenstreifen dar. Die oberen Enden a_1, b_1 .... aller dieser Wasserprismen liegen in einer Ebene BC, und es ist ABC $\left(= \frac{h^2}{2}\right)$ der Querschnitt eines Wasserprismas, welches den auf die ganze Wand AB wirkenden Druck darstellt.

Für ein Stück der Wand von der Tiefe $b = 1$ ergibt sich aus Gl. 225), wenn $F = bh = h$ und $x_0 = \frac{h}{2}$ eingesetzt wird:

$$D = \frac{\gamma h^2}{2} \qquad 226)$$

Der Mittelpunkt des Druckes liegt mit dem Schwerpunkt des Dreiecks ABC in gleicher Höhe; also um $^2/_3$ h unter der Oberkante B.

Aufgabe 104. Wie groß ist der Druck D auf den Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes, wenn die Bodenfläche $F = 3{,}2$ qm und die Wassertiefe $h = 1{,}5$ m beträgt?

Auflösung. Da 1 cbm Wasser $\gamma = 1000$ kg wiegt, so ist nach Gl. 224):

$$D = 3{,}2 \cdot 1{,}5 \cdot 1000 = 4800 \text{ kg}$$

Aufgabe 105. Welcher Druck kommt auf eine 4 m hohe Wassermauer für 1 m Tiefe, wenn der Wasserspiegel mit der Oberkante der Mauer in gleicher Höhe liegt?

Auflösung. Nach Gl. 226) ist:

$$D = 1000 \cdot \frac{4^2}{2} = 8000 \text{ kg}$$

Aufgabe 106. In einem Schleusentor befindet sich ein rechteckiger Schieber, dessen Höhe $= 0{,}8$ m und dessen Breite $= 0{,}6$ m beträgt. Die Oberkante des Schiebers liegt 1,2 m unter dem Wasserspiegel. Wie groß ist der auf den Schieber wirkende Wasserdruck?

Auflösung. Die Fläche des Schiebers ist:

$$F = 0{,}8 \cdot 0{,}6 = 0{,}48 \text{ qm}$$

Der Abstand des Schwerpunktes dieser Fläche vom Wasserspiegel ist:

$$x_0 = 1{,}2 + \frac{1}{2} \cdot 0{,}8 = 1{,}6 \text{ m}$$

Folglich nach Gl. 225):

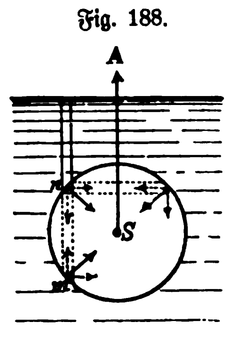
$$D = 1000 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}6 = 768 \text{ kg}$$

§ 31.

...liches, spezifisches, scheinbares Gewicht.

Zerlegt man die Drücke auf alle einzelnen Flächenteilchen in wagerechte und senkrechte Seitendrücke, so heben die ersteren sich gegenseitig auf; die letzteren dagegen nicht. Sind m und n (Fig. 188) zwei senkrecht übereinander liegende Flächenteilchen, so ist der nach oben gerichtete Druck, den das Teilchen m erhält, um das Gewicht der Flüssigkeitssäule m n größer als der nach unten gerichtete, auf das Teilchen n wirkende Druck. Die Mittelkraft sämtlicher nach oben gerichteter Drücke ist daher um das Gewicht der ganzen Flüssigkeitsmasse, welche gleichen Rauminhalt mit dem eingetauchten Körper hat, größer als die Mittelkraft der nach unten gerichteten Drücke.

Fig. 188.



Dieser Druckunterschied, d. i. die algebraische Summe der senkrechten Seitendrücke bildet eine aufwärts gerichtete Kraft, welche den eingetauchten Körper in die Höhe zu treiben sucht und Auftrieb genannt wird. Der Größe nach ist der Auftrieb gleich dem Gewichte der durch den eingetauchten Körper verdrängten Flüssigkeit; der Angriffspunkt desselben ist der Schwerpunkt S der verdrängten Wassermasse.

Da der Auftrieb eine dem Eigengewichte des Körpers entgegengesetzt gerichtete Kraft ist, so folgt: Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter fester Körper verliert an Gewicht so viel, als das Gewicht der Flüssigkeit beträgt, welche er verdrängt.

Bei einem vollständig eingetauchten Körper hat, wenn γ das Gewicht der Kubikeinheit der Flüssigkeit und V den Rauminhalt des eingetauchten Körpers bedeutet, der Auftrieb die Größe:

$$A = \gamma V \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 227)$$

Ist γ_1 das Gewicht der Kubikeinheit des (als gleichmäßig dicht voraus) gesetzten) Körpers, so ist das wirkliche Gewicht desselben:

$$G = \gamma_1 V \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 228)$$

Das Verhältnis:

$$\frac{G}{A} = \frac{\gamma_1}{\gamma} = s \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 229)$$

ist das spezifische Gewicht des Körpers in bezug auf die Flüssigkeit, in welche er getaucht ist. Allgemein wird als Flüssigkeit Wasser von 4° C. angenommen. Unter dieser Annahme ist das spezifische Gewicht eines Körpers diejenige Zahl, welche angibt, wieviel mal so schwer der Körper ist als ein gleich großer Raumteil Wasser von 4°.

Das spezifische Gewicht des Wassers ist danach = 1.

Da 1 cbdcm Wasser 1 kg wiegt, so ist das spezifische Gewicht eines Körpers gleich dem wirklichen Gewichte eines Kubikdezimeters desselben in Kilogramm oder gleich dem Gewichte eines Kubikzentimeters in Gramm.

Nach Gl. 229) ist:

$$G = As$$

o wenn man für A den Wert aus Gl. 227) einsetzt:

$$G = \gamma V s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 230)$$

. h. das wirkliche Gewicht eines Körpers ist gleich dem Gewichte iner Wassermasse von gleichem Rauminhalt, multipliziert mit dem spezifischen Gewichte des Körpers.

Ist das spezifische Gewicht des eingetauchten Körpers gleich dem spezifischen Gewichte des Wassers (= 1), so ist das wirkliche Gewicht desselben gleich dem Auftrieb, und der Körper befindet sich an jeder Stelle unterhalb der Oberfläche im Gleichgewicht.

Hat der Körper ein spezifisches Gewicht, welches kleiner als 1 ist, so wird er nur so weit im Wasser eingetaucht sein, daß das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers seinem wirklichen Gewichte gleich ist; d. h. der Körper schwimmt.

Bezeichnet man bei einem schwimmenden Körper den Rauminhalt des eingetauchten Teiles mit V_1, so ist:

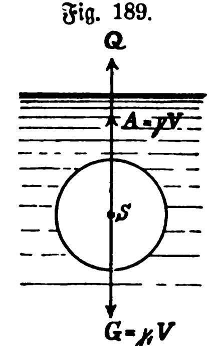
$$G = \gamma V_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 231)$$

Aus Gl. 230) und 231) folgt dann:

$$s = \frac{V_1}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 232)$$

Ist der Körper schwerer als Wasser, so muß noch eine aufwärts gerichtete Kraft Q wirken, um denselben im Gleichgewichte zu halten (Fig. 189). Diese Kraft, welche man das scheinbare oder relative Gewicht des Körpers nennt, hat die Größe:

Fig. 189.



$$Q = G - A$$

oder, wenn für A und G die Werte aus den Gleichungen 227) und 230) eingesetzt werden:

$$Q = \gamma V (s - 1) \quad \ldots\ldots \quad 233)$$

Durch Wägung eines Körpers außerhalb des Wassers und im Wasser läßt sich das spezifische Gewicht desselben bestimmen. Durch Subtraktion der Gleichungen 230) und 233) folgt nämlich:

$$G - Q = \gamma V$$

und durch Division der Gl. 230) durch den letzten Ausdruck ergibt sich:

$$s = \frac{G}{G - Q} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 23\ldots$$

Das spezifische Gewicht eines Körpers ist gleich d... wirklichen Gewichte, dividiert durch den Unterschied des wi... lichen und scheinbaren Gewichtes desselben.

Besteht ein Körper aus einer Mischung zweier Stoffe von verschiede... ... ber bekannten spezifischen Gewichten, so läßt sich durch Wägung des Kö...

außerhalb des Wassers und im Wasser der Rauminhalt jedes der beiden Stoffe berechnen.

Ist V_1 der Rauminhalt und s_1 das spezifische Gewicht des ersten Stoffes
" V_2 " " " s_2 " " " " zweiten "
so hat man, entsprechend den Gleichungen 230) und 233):

$$G = \gamma V_1 s_1 + \gamma V_2 s_2$$
$$Q = \gamma V_1 (s_1 - 1) + \gamma V_2 (s_2 - 1)$$

Durch Auflösung für V_1 und V_2 folgt hieraus:

$$V_1 = \frac{Q - \left(1 - \frac{1}{s_2}\right) G}{\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right) \gamma} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 235)$$

$$V_2 = \frac{Q - \left(1 - \frac{1}{s_1}\right) G}{\left(\frac{s_2}{s_1} - 1\right) \gamma} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 236)$$

Liegt ein Körper, z. B. eine ebene Platte, deren Oberfläche $= F$ und deren Gewicht $= G$ ist, auf dem Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes so vollständig auf, daß kein Wasser darunter gelangen kann (Fig. 190), so ist auch kein Auftrieb vorhanden, und die zum Emporziehen der Platte erforderliche Kraft hat dann die Größe:

$$K = G + \gamma F h \quad \ldots\ldots \quad 237)$$

Fig. 190.

Aufgabe 107. Der Rauminhalt eines Gußstückes wurde zu 0,65 cbm berechnet. Was wiegt dasselbe, wenn das spezifische Gewicht des Gußeisens zu 7,25 angenommen wird?

Auflösung. Nach Gl. 230):

$$G = 1000 \,.\, 0{,}65 \,.\, 7{,}25 = 4712{,}5 \text{ kg}$$

Aufgabe 108. Ein prismatischer Holzbalken von 3 m Länge, 25 cm Breite, 16 cm Dicke wurde mit seiner breiten Seitenfläche ins Wasser gelegt und sank so tief ein, daß sich seine Oberkante noch 5 cm über dem Wasserspiegel befand. Wie groß ist das spezifische Gewicht desselben?

Auflösung. Nach Gl. 232):

$$s = \frac{V_1}{V} = \frac{3 \,.\, 0{,}25 \,.\, (0{,}16 - 0{,}05)}{3 \,.\, 0{,}25 \,.\, 0{,}16} = \frac{11}{16} = 0{,}6875$$

Aufgabe 109. Ein Stück Blei wiegt außerhalb des Wassers 10 kg. Wie groß ist das scheinbare Gewicht desselben, wenn das spezifische Gewicht des Bleies zu 11,4 angenommen wird?

Auflösung. Nach Gl. 234) ist:

$$Q = G\left(1 - \frac{1}{s}\right) = 10\left(1 - \frac{1}{11{,}4}\right) = 9{,}123 \text{ kg}$$

Aufgabe 110. Ein Maschinenteil aus Messing (Legierung aus Kupfer und Zink) wiegt in der Luft G = 100 kg; im Wasser Q = 87,8 kg. Wieviel Kupfer (spez. Gewicht $s_1 = 8{,}8$) und wieviel Zink (spez. Gewicht $s_2 = 7$) enthält derselbe?

Auflösung. Nach den Gleichungen 235) und 236) ist:

$$V_1 = \frac{87{,}8 - \left(1 - \frac{1}{7}\right) 100}{\left(\frac{8{,}8}{7} - 1\right) 1000} = 0{,}0081$$

$$V_2 = \frac{87{,}8 - \left(1 - \frac{1}{8{,}8}\right) 100}{\left(\frac{7}{8{,}8} - 1\right) 1000} = 0{,}0041$$

Hierfür ergeben sich die Gewichte nach Gl. 230) zu:

$G_1 = 1000 \,.\, 0{,}0081 \,.\, 8{,}8 = 71{,}3$ kg Kupfer
$G_2 = 1000 \,.\, 0{,}0041 \,.\, 7 = 28{,}7$ kg Zink.

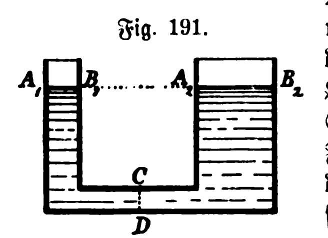
§ 32.

Zusammenhängende (kommunizierende) Röhren.

Zwei Gefäße, welche so miteinander in Verbindung stehen, daß Flüssigkeiten frei von dem einen in das andere gelangen können, nennt man zusammenhängende oder kommunizierende Röhren. Die Gefäße können dabei nebeneinander liegen und durch ein besonderes Rohr miteinander verbunden sein (Fig 191 und 193), oder das eine weitere Gefäß umschließt das engere (Fig. 192).

Enthalten die zusammenhängenden Röhren die gleiche Flüssigkeit (z. B. Wasser), so steht dieselbe in beiden Schenkeln gleich hoch; die Oberflächen $A_1 B_1$ und $A_2 B_2$ (Fig. 191) liegen in einer Wagerechten. Die Flüssigkeit kann sich natürlich nur dann im Gleichgewichte befinden, wenn ein beliebiger Querschnitt CD des Verbindungsrohres zu beiden Seiten den gleichen Druck erhält. Dieses ist der Fall, wenn der Flüssigkeitsspiegel in beiden Schenkeln die gleiche Höhe über dem Schwerpunkt des Querschnittes CD hat.

Fig. 191.



Enthalten die zusammenhängenden Röhren ungleichartige Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischen Gewichte, so steht im Gleichgewichtszustande die leichtere Flüssigkeit in dem einen Schenkel höher als die schwerere in dem andern Schenkel. Sind s_1 und s_2 die spezifischen Gewichte der Flüssigkeiten, h_1 und h_2 die Höhen der Flüssigkeitsspiegel über der Trennungsfläche MN = F (Fig. 192 und 193), so ist, da diese von beiden Seiten gleichen Druck erhalten muß, nach (Gl. 230) S. 166:

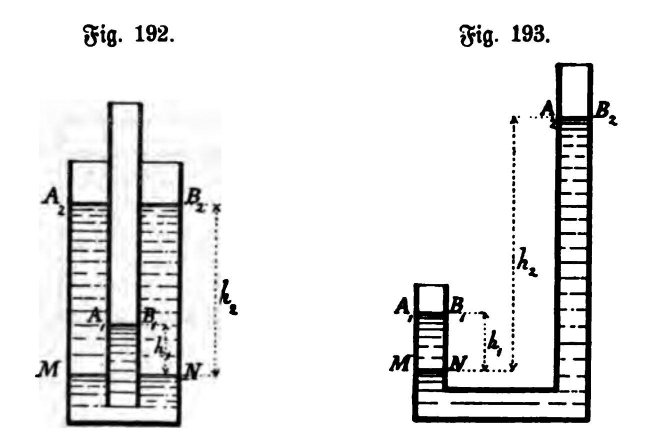
$$\gamma F h_1 s_1 = \gamma F h_2 s_2$$

oder:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{s_2}{s_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 238)$$

d. h.: **Die Höhen der Flüssigkeitsspiegel über der Trennungsfläche verhalten sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte der Flüssigkeiten.**

Fig. 192. Fig. 193.



Dieses Gesetz hat keine Gültigkeit für **sehr enge** Röhren, sogen. **Haarröhrchen** (vergl. S. 3).

Die zusammenhängenden Röhren finden u. a. Anwendung zu Nivellierinstrumenten.

Abschnitt V.

Die Lehre von der Bewegung (Dynamik) tropfbar flüssiger Körper.

§ 33.

Ausfluß des Wassers aus Gefäßen.

Für frei herabfallendes Wasser gelten dieselben Gesetze wie für frei fallende feste Körper.

Ist Q die in der Sekunde zuströmende Wassermenge in Kubikmeter (also 1000 Q deren Gewicht in kg; $\frac{1000\,Q}{g}$ deren Masse), h die Gefällhöhe oder das Gefälle und v die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser unten ankommt (Fig. 194), so ist nach Gl. 22) S. 25:

$$1000\ Q h = \frac{1000\ Q}{g} \frac{v^2}{2}$$

Also:

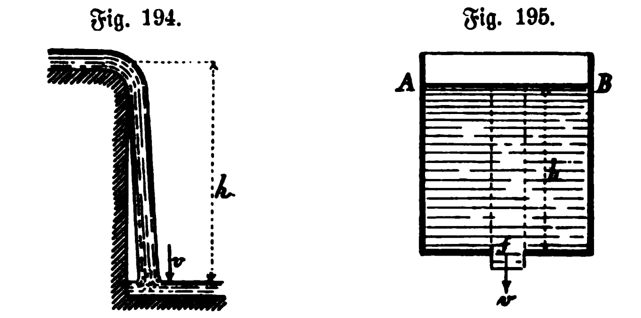
$$h = \frac{v^2}{2g} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 239)$$

oder:

$$v = \sqrt{2gh} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 240)$$

$\frac{v^2}{2g}$ wird als Geschwindigkeitshöhe bezeichnet.

Fig. 194. Fig. 195.



Ist das Wasser in einem zylindrischen Gefäße eingeschlossen (Fig. 195), und würde dessen Boden plötzlich entfernt, so wird die ganze Wassermasse ebenfalls frei herabfallen, und die obere Wasserschicht AB unten mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$ ankommen.

Wird dagegen nicht der ganze Boden, sondern nur ein Teil desselben vom Querschnitt f plötzlich entfernt, so kann nur die darüber befindliche Wassersäule frei herabfallen, und diejenigen Wasserteilchen dieser Säule, die vorher an der Oberfläche sich befanden, werden unten mit der Geschwindigkeit v ankommen. Wenn nun durch seitlichen Zufluß dafür gesorgt wird, daß die Druckhöhe h unverändert bleibt, so haben auch bei längere Zeit dauerndem Ausfluß sämtliche unten ankommenden Wasserteilchen die Höhe h durchfallen; es ist deshalb die theoretische Ausflußgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$ und danach die durch den Querschnitt f in der Sekunde ausfließende theoretische Wassermenge:

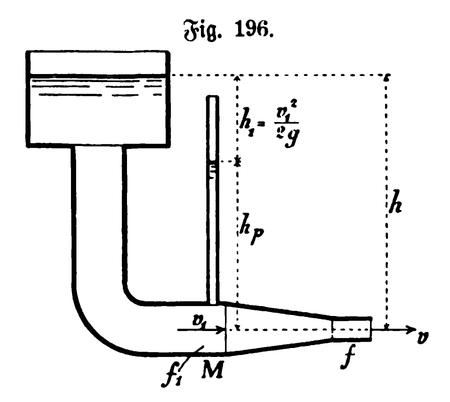
$$Q = f\sqrt{2gh} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 241)$$

Das Gefäß sei nun unten mit einem Rohr versehen (Fig. 196), welches in gewisser Tiefe gebogen ist und dann wagerecht verläuft. Das Rohr hat in M den Querschnitt f_1, verjüngt sich von dort ab allmählich und endigt in einem Mundstücke mit dem kleineren Querschnitt f.

Die Geschwindigkeit an der Ausflußmündung entspricht auch hier der ganzen Gefällhöhe h und hat die Größe:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Fig. 196.



Ebenso ist die in der Sekunde ausfließende Wassermenge nach Gl. 241):

$$Q = fv = f\sqrt{2gh}$$

Da dieselbe Wassermenge auch jeden anderen Querschnitt der Rohrleitung in der Sekunde durchfließen muß, so ist für den in gleicher Höhe mit der Ausflußöffnung liegenden Querschnitt bei M:

$$f_1 v_1 = fv$$

Folglich:

$$v_1 = \frac{f}{f_1} v = \frac{f}{f_1} \sqrt{2gh}$$

also (da $f_1 > f$) kleiner als v, d. h. kleiner, als der ganzen Gefällhöhe entspricht.

Die der Geschwindigkeit v_1 entsprechende Gefällhöhe ist aber nach Gl. 239):

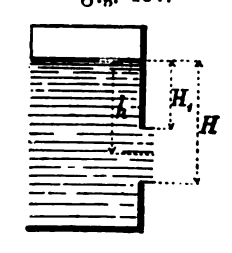
$$h_1 = \frac{v_1^2}{2g}$$

Folglich ist für den Querschnitt in M (Fig. 196) die Gefällhöhe:

$$h_p = h - h_1 = h - \frac{v_1^2}{2g}$$

nicht zur Erzeugung von Geschwindigkeit ausgenutzt und als sogen. **Pressungshöhe** noch vorhanden.*) In einem an dieser Stelle aufgesetzten, oben offenen Röhrchen (**Piezometer-Röhrchen**) würde das Wasser bis auf die Höhe h_p hinaufgepreßt werden.

Fig. 197.



Befindet sich die Ausflußöffnung nicht am Boden, **sondern an der Seite des Gefäßes** (Fig. 197), so sind die Druckhöhen für die verschiedenen Punkte der Öffnung und damit auch die Geschwindigkeiten der ausfließenden Wasserteilchen verschieden.

Ist die Höhe der Seitenöffnung verhältnismäßig **klein**, so weichen die Geschwindigkeiten nicht viel voneinander ab, und man kann zur Berechnung der in der

*) Dieser Grundgedanke ist maßgebend bei der Konstruktion der **Überdruckturbinen** (Reaktions-Turbinen).

Sekunde ausfließenden Wassermenge nach Gl. 241) genügend genau die Entfernung des Schwerpunktes der Ausflußöffnung vom Wasserspiegel als unveränderliche Druckhöhe h annehmen (wie z. B. auch bei Fig. 196).

Bei größerer Höhe der seitlichen Ausflußöffnung denke man sich dagegen die ganze Querschnittsfläche des austretenden Wasserstrahles in sehr viele wagerechte Streifen von der sehr kleinen Höhe $\triangle$ zerlegt (Fig. 198). Für einen Streifen in der Tiefe y unter dem Wasserspiegel ist dann die Ausflußgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{2gy}$$

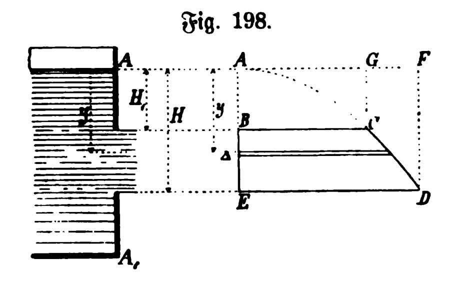
und unter Voraussetzung einer rechteckigen Ausflußöffnung von der Breite b die durch diesen Querschnittsstreifen ausfließende Wassermenge:

$$q = b \triangle \sqrt{2gy} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 242)$$

Die durch die ganze Öffnung austretende Wassermenge ist danach:

$$Q = \Sigma(b \triangle \sqrt{2gy}) = b\,\Sigma(\triangle \sqrt{2gy}) \quad \ldots\ldots \quad 243)$$

Fig. 198.



Denkt man sich nun die durch die einzelnen Querschnittsstreifen ausfließenden Wassermengen q als wagerechte Prismen mit ihrem einen Endpunkte senkrecht übereinander gelegt, so liegen, da sich nach Gl. 242) die einzelnen Wassermengen verhalten wie die Quadratwurzeln aus den zugehörigen Druckhöhen, die anderen Endpunkte derselben in einer Parabel mit dem Scheitel in A (Fig. 198). Die ganze ausfließende Wassermenge Q ist danach gleich einem Prisma vom Querschnitt BCDE.

Nach Fig. 198 ist:

$$BCDE = ADE - ACB$$

und da eine Parabelfläche bekanntlich $= {}^2/_3$ des aus Sehne und Höhe konstruierten Rechtecks ist, so wird:

$$BCDE = {}^2/_3\, AFDE - {}^2/_3\, AGCB$$

oder:

$$\Sigma(\triangle \sqrt{2gy}) = {}^2/_3\, H \sqrt{2gH} - {}^2/_3\, H_1 \sqrt{2gH_1}$$

Danach ergibt sich nach Gl. 243) die ganze ausfließende Wassermenge zu:

$$Q = {}^2/_3\, b \sqrt{2g}\,(H^{3/2} - H_1^{\,3/2}) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 244)$$

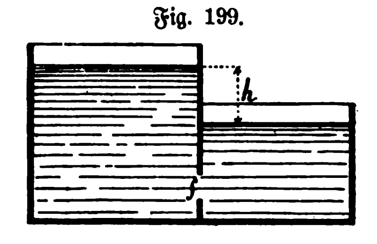
worin b die Breite der Ausflußöffnung, H die Tiefe der Unterkante und H_1 die Tiefe der Oberkante unter dem Wasserspiegel bedeutet.

Für $H_1 = 0$, d. h. wenn die Oberkante der Ausflußöffnung mit dem Oberwasserspiegel abschneidet, folgt aus Gl. 244):

$$Q = {}^2/_3\, b\, H \sqrt{2gH} \qquad \text{245)}$$

Bei einer Ausflußöffnung unter Wasser (Fig. 199) ist zur Berechnung von Q als Druckhöhe der senkrechte Abstand h der Wasserspiegel der beiden angrenzenden Gefäße in Gl. 241) einzusetzen.

Fig. 199.



Die wirklich ausfließende Wassermenge weicht von der theoretischen mehr oder weniger ab. Dieses hat seinen Grund darin, daß durch das von den Seiten schief nach der Ausflußöffnung sich drängende Wasser einerseits die Ausflußgeschwindigkeit vermindert wird; andererseits nicht der volle Querschnitt der Öffnung zur Geltung kommt, sondern der austretende Wasserstrahl eingeschnürt (kontrahiert) wird.

Um die wirklich austretende Wassermenge zu erhalten, sind daher die in den Gleichungen 241), 244), 245) angegebenen Werte noch mit einem sogen. Ausflußkoeffizienten μ zu multiplizieren, der, je nachdem die Einschnürung vollkommen oder unvollkommen ist, verschieden groß anzunehmen ist.

Die Einschnürung ist vollkommen, wenn die Ausflußöffnung am ganzen Umfange mit von außen her zugeschärfter Kante versehen ist, und wenn zugleich die Weite der Öffnung im Verhältnis zum Abstande von der nächstliegenden Gefäßkante und zur Druckhöhe gering ist. In diesem Falle kann man den Ausflußkoeffizienten erfahrungsgemäß annehmen zu:

$$\mu = 0{,}62 \qquad \text{246)}$$

Die Einschnürung ist unvollkommen, wenn eine oder mehrere Seiten der Ausflußöffnung Fortsetzungen der Gefäßwände bilden. Bezeichnet man den Koeffizienten für unvollkommene Einschnürung mit μ_1, und ist U der ganze Umfang der Ausflußöffnung, nU derjenige Teil des Umfangs, welcher keine Einschnürung (Kontraktion) bewirkt, so ist zu setzen:

$$\text{für rechteckige Öffnungen: } \mu_1 = (1 + 0{,}15\, n)\, \mu \qquad \text{247)}$$

$$\text{„ runde „ } \mu_1 = (1 + 0{,}13\, n)\, \mu \qquad \text{248)}$$

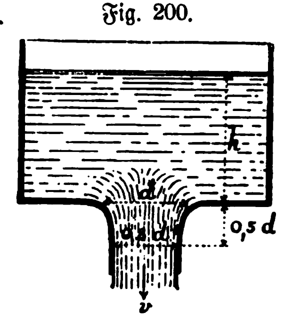
Danach ist folgende Tabelle berechnet:

Für n =	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	
wird μ_1 =	0,643	0,667	0,690	bei rechteckiger Öffnung
„ μ_1 =	0,640	0,660	0,680	„ runder Öffnung

Bei Anwendung eines kurzen kegelförmigen Abflußrohres mit gut abgerundeten Kanten, dessen oberer Durchmesser d sich nach unten allmählich verjüngt und im Abstande 0,5 d vom Gefäßboden nur noch 0,8 d beträgt (Fig. 200), findet keine weitere Einschnürung des ausfließenden Wasserstrahles statt. Der Ausflußkoeffizient hat in diesem Falle die Größe:

$$\mu = 0{,}96 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 249)$$

Fig. 200.



Danach ist, wenn der dem Durchmesser 0,8 d entsprechende Querschnitt des Rohres mit f bezeichnet wird, die wirkliche in der Sekunde ausfließende Wassermenge:

$$Q = 0{,}96 f \sqrt{2gh} \quad . \; . \; . \quad 250)$$

Aufgabe 111. Welche Wassermenge Q fließt in einer Minute aus einer am Boden eines Gefäßes angebrachten Öffnung f = 8 qcm Querschnitt bei einer unveränderlichen Druckhöhe h = 2,5 m, wenn vollkommene Einschnürung angenommen wird?

Auflösung. Die theoretische Wassermenge ist nach Gl. 241):

$$Q = 60 \,.\, 0{,}0008 \sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, 2{,}5} = 0{,}336 \text{ cbm}$$

Folglich ist bei $\mu = 0{,}62$ (Gl. 246) die wirklich ausfließende Wassermenge:

$$\mu Q = 0{,}62 \,.\, 0{,}336 = 0{,}20832 \text{ cbm} = \backsim 208 \text{ Liter.}$$

Aufgabe 112. Die Unterkante eines 1,4 m breiten Spannschützen sei 0,16 m vom Gerinnboden entfernt. Wie groß ist die in der Sekunde durchströmende Wassermenge, wenn die Höhe des Oberwasserspiegels über dem Gerinnboden 1,2 m beträgt?

Auflösung. Der ganze Umfang der Ausflußöffnung ist:

$$U = 2 \,.\, 0{,}16 + 2 \,.\, 1{,}4 = 3{,}12 \text{ m}$$

An beiden Seiten und am Boden findet keine Einschnürung statt; folglich:

$$nU = 2 \,.\, 0{,}16 + 1{,}4 = 1{,}72 \text{ m}$$

Also:

$$n = \frac{nU}{U} = \frac{1{,}72}{3{,}12} = 0{,}55$$

Bei $\mu = 0{,}62$ wird dann nach Gl. 247):

$$\mu_1 = (1 + 0{,}15 \,.\, 0{,}55)\, 0{,}62 = 0{,}67$$

Durch Einsetzung der Werte: $b = 1{,}4$ m; $H = 1{,}2$ m; $H_1 = 1{,}2 - 0{,}16 = 1{,}04$ m in Gl. 244) S. 172 ergibt sich die theoretische Wassermenge zu:

$$Q = {}^2/_3 \,.\, 1{,}4 \,.\, \sqrt{2 \,.\, 9{,}81}\, (1{,}2^{3/2} - 1{,}04^{3/2}) = 1{,}075 \text{ cbm}$$

Also die wirklich ausfließende Wassermenge:

$$\mu_1 Q = 0{,}67 \,.\, 1{,}075 = 0{,}720 \text{ cbm} = 720 \text{ Liter}$$

Die Annäherungsrechnung (Gl. 241) würde nur ergeben (vergl. Fig. 197 S. 171):

$$\mu_1 Q = 0{,}67 \,.\, 0{,}16 \,.\, 1{,}4 \sqrt{2 \,.\, 9{,}81\, (1{,}2 - {}^1/_2 \,.\, 0{,}16)}$$

$$\mu_1 Q = 0{,}67 \,.\, 0{,}224 \,.\, 4{,}69 = 0{,}704 \text{ cbm} = 704 \text{ Liter}$$

§ 34.

Hydraulischer Druck.

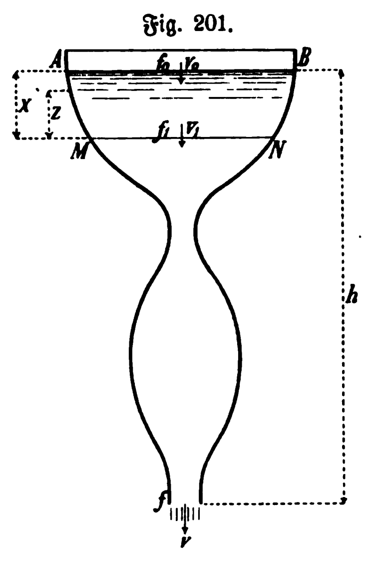
Während man den Druck in einer ruhenden Flüssigkeit als hydrostatischen Druck bezeichnet (§ 28 S. 156), versteht man unter hydraulischem Druck denjenigen, welcher in einer in Bewegung befindlichen, von Gefäßwänden umgebenen Flüssigkeit herrscht.

Für eine und dieselbe Stelle innerhalb des Gefäßes kann unter Umständen der hydraulische Druck von dem hydrostatischen sehr verschieden sein.

Das in Fig. 201 dargestellte Gefäß sei mit Wasser gefüllt und zunächst unten geschlossen, so daß das Wasser sich in Ruhe befindet. Es ist dann für einen Querschnitt MN, welcher um x unter dem Oberwasserspiegel liegt, nach § 30 S. 162 der hydrostatische Druck p auf die Flächeneinheit gleich dem Gewichte einer Wassersäule von der Höhe x; also wenn mit γ das Gewicht der Kubikeinheit Wasser bezeichnet wird:

$$p = \gamma x \text{ oder: } x = \frac{p}{\gamma}$$

Fig. 201.



Durch Öffnen der unteren Gefäßmündung tritt die Wasserbewegung und mit dieser eine Änderung in den Druckverhältnissen ein. Es sei z die Höhe der Wassersäule, deren Gewicht den im Querschnitt MN herrschenden hydraulischen Druck $\mathfrak{p}$ darstellt; dann ist:

$$\mathfrak{p} = \gamma z \text{ oder: } z = \frac{\mathfrak{p}}{\gamma}$$

Es kommt nun darauf an, die hydraulische Druckhöhe z näher zu bestimmen.

Für die Querschnitte und Wassergeschwindigkeiten sollen nach Fig. 201 folgende Bezeichnungen gelten:

f_0 und v_0 für den Oberwasserspiegel AB
f „ v „ die untere Ausflußöffnung
f_1 „ v_1 „ die Stelle MN

h bedeutet die ganze Gefällhöhe.

Betrachtet man die gesamte Wassermasse zwischen Oberwasserspiegel und unterer Ausflußöffnung, so ist nach Gl. 21) S. 25, in welcher mg für P und h für s einzusetzen ist:

$$m g h = \frac{m v^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2}$$

Für die Wassermasse zwischen der Stelle MN und der unteren Ausflußöffnung ist die wirksame Gefällhöhe $= h - x + z$; daher ebenso nach Gl. 21):

$$m g (h - x + z) = \frac{m v^2}{2} - \frac{m v_1^2}{2}$$

Durch Subtraktion der beiden Gleichungen voneinander folgt:

$$m g (z - x) = - \frac{m v_1^2}{2} + \frac{m v_0^2}{2}$$

oder:

$$z = x - \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad 251)$$

d. h.: **Die hydraulische Druckhöhe für eine bestimmte Stelle ist gleich der hydrostatischen Druckhöhe, vermindert um den Unterschied der Geschwindigkeitshöhen an der betreffenden Stelle und am Oberwasserspiegel.**

Die Gl. 251) läßt sich auch schreiben:

$$z = x - \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{v_0^2}{v_1^2} \right)$$

Nun ist aber:

$$f_0 v_0 = f_1 v_1$$

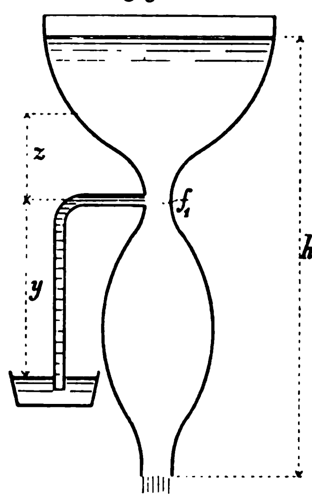
oder:

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{f_1}{f_0}$$

Also nach Einsetzung dieses Wertes in Gl. 251):

$$z = x - \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{f_1^2}{f_0^2} \right) \quad \ldots \quad 252)$$

Fig. 202.



Hiernach ist für $f_1 < f_0$ die **hydraulische Druckhöhe kleiner als die hydrostatische Druckhöhe.** Bei der Durchflußbewegung des Wassers wird also der Druck auf die Gefäßwände in allen Querschnitten, welche kleiner sind als der Querschnitt des Oberwasserspiegels, kleiner als (in dem unten geschlossenen Gefäße) der Druck des ruhenden Wassers.

Durch genügende örtliche Zusammenschnürung des Gefäßes läßt sich sogar erreichen, daß durch eine an der verengten Stelle angebrachte Öffnung kein Wasser ausfließt, sondern vielmehr Luft angesaugt wird. Bringt man an dieser Stelle ein abwärts gekrümmtes, mit seinem unteren Ende in einen offenen Wasserbehälter eingetauchtes Röhrchen an (Fig. 202), so wird das Wasser in demselben emporsteigen und in das Hauptgefäß hineinströmen, wenn $y + z < 10{,}33$ m ist (vergl. § 39).

Ein Beispiel des hydraulischen Druckes bot bereits Fig. 196 S. 171. Nimmt man nämlich (wie dort geschehen) den Oberwasserspiegel unveränderlich an, so daß v_0 = Null wird, so geht Gl. 251) für $x = h$ über in:

$$z = h - \frac{v_1^2}{2g}$$

Die hydraulische Druckhöhe z stimmt in diesem Falle mit dem S. 171 als Pressungshöhe bezeichneten Werte h_p überein.

§ 35.

Bewegung des Wassers in Rohren.

Fließt Wasser durch eine längere Rohrleitung, so erleidet es durch die Reibung an den Rohrwänden einen Verlust an Geschwindigkeit. Von der gesamten Druckhöhe h geht daher ein Teil h_1 für die Geschwindigkeit verloren und wird aufgewandt zur Überwindung der Reibung; der Rest $(h - h_1)$ kommt für Erzeugung der Geschwindigkeit v in Betracht. Es ist daher:

$$h - h_1 = \frac{v^2}{2g} .$$

oder:

$$h = \frac{v^2}{2g} + h_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 253)$$

h_1 wird um so größer, je länger das Rohr und je kleiner dessen Durchmesser ist, und wächst erfahrungsgemäß proportional mit dem Quadrate der Geschwindigkeit. Bezeichnet man die Länge der Rohrleitung mit l, den Durchmesser derselben mit d, so kann für neue gußeiserne Rohre bei mittleren Geschwindigkeiten angenommen werden:*)

*) Allgemein ist:

$$h_1 = k \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$ (k = Reibungskoeffizient zwischen Wasser und Rohrwand.)

worin nach Weisbach, der seine Versuche mit neuen glatten Rohren ausführte, zu setzen ist:

$$k = 0{,}01439 + \frac{0{,}00947}{\sqrt{v}}$$

Für v = 1 m entsteht:

$$k = 0{,}02386$$

oder abgerundet wie oben in Gl. 254):

$$k = 0{,}024$$

Nach Versuchen von Lang ist für glatte gußeiserne Rohre:

$$k = 0{,}02 + \frac{0{,}004}{\sqrt{v}}$$

für v = 1 m auch hiernach:

$$k \doteq 0{,}024$$

$$h_1 = 0{,}024 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 254)$$

Durch Einsetzung dieses Wertes in Gl. 253) erhält man:

$$h = \frac{v^2}{2g}\left(1 + 0{,}024 \frac{l}{d}\right)$$

oder:

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + 0{,}024 \frac{l}{d}}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 255)$$

Für ältere Rohre ist mit Rücksicht auf Rostbildung und dadurch bedingte verstärkte Ablagerung der Sicherheit wegen (nach Dupuit) zu setzen:

$$h_1 = 0{,}03 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 256)$$

und danach:

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + 0{,}03 \frac{l}{d}}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 257)$$

Ein anderer besonderer Widerstand tritt in Rohrleitungen bei Einschaltung von Kniestücken und Krümmern auf, wodurch ein weiterer Teil h_2 von der gesamten Druckhöhe h für die Geschwindigkeit verloren geht. Das Wasser folgt nämlich nicht ganz der plötzlichen Richtungsveränderung und füllt an dem Knicke bezw. der scharfen Biegung den Rohrquerschnitt nicht vollständig aus (Fig. 203 und 204).

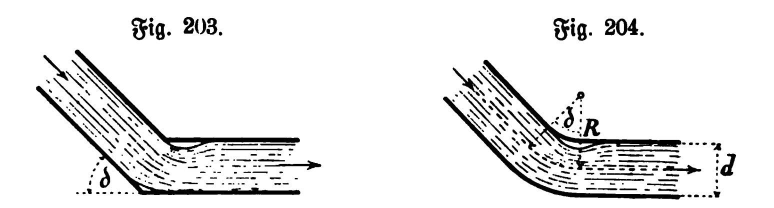


Fig. 203. Fig. 204.

Nach Versuchen von Weisbach ist zu setzen:

a) für Kniestücke mit dem Winkel δ (Fig. 203):

$$h_2 = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 258)$$

worin:

$$\zeta = 0{,}9457 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + 2{,}047 \sin^4\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \ldots \quad 259)$$

für δ =	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
wird ζ =	0,046	0,073	0,139	0,234	0,364	0,533	0,740	0,984

b) **für Krümmer** mit dem Zentriwinkel δ und dem mittleren Krümmungshalbmesser R (Fig. 204):

$$h_2 = \zeta' \frac{\delta^0}{90} \frac{v^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 260)$$

worin:

$$\zeta' = 0{,}131 + 0{,}163 \left(\frac{d}{R}\right)^{3,5} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 261)$$

für $\frac{d}{R}$ =	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,25
wird ζ' =	0,138	0,145	0,158	0,206	0,294	0,487

Über die beim Durchgange des Wassers durch **Ventile, Hähne, Schieber** und **Drosselklappen** auftretenden Widerstände sind eingehende Versuche angestellt von **Weisbach, Bach** und **Lang**, deren Ergebnisse zusammengestellt sind z. B. in „Des Ingenieurs Taschenbuch Hütte" 1905, I. Teil S. 254.

Aufgabe 113. Von einem größeren Behälter aus fließt Wasser durch eine 6 km lange Rohrleitung nach einem Punkte, welcher 16 m tiefer liegt als der Wasserspiegel des Behälters. Wie groß ist die Ausflußgeschwindigkeit v, wenn der Durchmesser des Rohres 20 cm beträgt, und wieviel Wasser fließt in der Minute aus?

Auflösung. Nach Gl. 255) ist für neue Rohre:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 16}{1 + 0{,}024 \frac{6000}{0{,}2}}} = 0{,}66 \text{ m}$$

Folglich:

$$Q = 60 \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \cdot v = 60 \cdot \frac{0{,}2^2 \cdot 3{,}14}{4} \cdot 0{,}66 = 1{,}244 \text{ cbm}$$

Nach Gl. 257) ist für ältere (länger gebrauchte) Rohre:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 16}{1 + 0{,}03 \frac{6000}{0{,}2}}} = 0{,}59 \text{ m}$$

und:

$$Q = 60 \cdot \frac{0{,}2^2 \cdot 3{,}14}{4} \cdot 0{,}59 = 1{,}112 \text{ cbm}$$

Ohne Leitungswiderstände würde sich ergeben:

$$v = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 16} = 17{,}72 \text{ m}^{*)} \qquad Q = 33{,}4 \text{ cbm}$$

*) Siehe Anhang Tab. III b.

§ 36.

Bewegung des Wassers in Kanälen.

Ein Kanal wird meistens mit Gefälle angelegt; d. h. die Kanalsohle ist gegen die Wagerechte geneigt, bildet also gewissermaßen eine schiefe Ebene, über welche das Wasser ohne Berücksichtigung der Reibung mit beschleunigter Bewegung hinabgleiten würde. Durch die Reibung am Boden und an den Seitenwänden des Kanals entsteht aber ein Widerstand, welcher verzögernd auf die Bewegung des Wassers einwirkt und proportional mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wächst, so daß bei gleichbleibendem Gefälle und unverändertem Kanalquerschnitt die Bewegung für eine gewisse Geschwindigkeit gleichförmig wird.

Ist F der Wasserquerschnitt im Kanale, v die mittlere Geschwindigkeit, so ist die in einer Sekunde durchströmende Wassermenge:

$$Q = F v \qquad 262)$$

Die Geschwindigkeit ist nicht in allen Punkten desselben Querschnittes die gleiche; sie ist am größten in der Mitte des Kanals etwas unter der Oberfläche und nimmt von dort nach dem Boden und nach den Seiten hin ab. Praktisch wird die Geschwindigkeit am sichersten gemessen mit dem Woltmannschen Flügel; einfacher, aber unsicherer mit einem Schwimmer. Zur theoretischen Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit v sind verschiedene Formeln aufgestellt, von denen die gebräuchlichste wohl die Formel von Bazin ist. Dieselbe lautet allgemein:

$$v = c \sqrt{R J} \qquad 263)$$

Es bezeichne:

l die Länge des Kanals, h die Gefällhöhe des Kanals: $J = \frac{h}{l}$ das Gefälle des Kanals (Wasserspiegelgefälle)

F den Wasser führenden Kanalquerschnitt, U den benetzten Umfang des Kanalquerschnittes: $R = \frac{F}{U}$ (sog. hydraulischer Radius)

c ist ein Erfahrungswert, welcher nach Bazin beträgt:

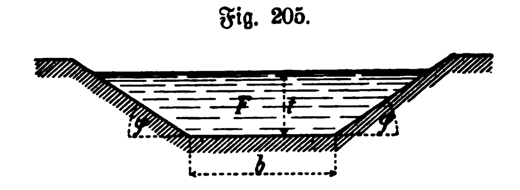
$$c = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \frac{\beta}{R}}} \qquad 264)$$

Für α und β sind je nach dem Materiale, aus dem der Kanal hergestellt ist, verschiedene Werte einzusetzen:

$\alpha = 0{,}00015$; $\beta = 0{,}0000045$ für gehobeltes Holz und Zement
$\alpha = 0{,}00019$; $\beta = 0{,}0000133$ „ Quader, Ziegel und nicht gehobeltes Holz
$\alpha = 0{,}00024$; $\beta = 0{,}00006$ „ Bruchsteinmauerwerk
$\alpha = 0{,}00028$; $\beta = 0{,}00035$ „ Erde
$\alpha = 0{,}0004$; $\beta = 0{,}0007$ „ Gerölle

Der Kanalquerschnitt muß so angeordnet werden, daß der Gefällverlust möglichst gering ist. Da dieser abhängt vom Reibungswiderstande, welcher wieder proportional dem benetzten Umfang ist, so ist Bedingung für eine günstige Anlage, daß der benetzte Umfang U so klein wie möglich wird.

Fig. 205.



Diese Bedingung wird erfüllt, wenn man setzt (Fig. 205):

$$t = \sqrt{\frac{F \sin \varphi}{2 - \cos \varphi}} \qquad b = 2t \,.\, \operatorname{tg} \varphi$$

Der benetzte Umfang wird dann:

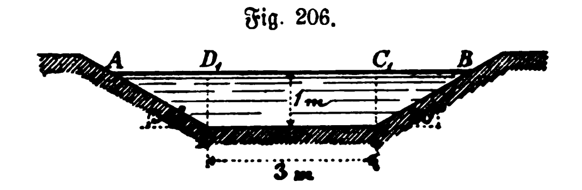
$$U = b + \frac{2t}{\sin \varphi}$$

Danach ist für verschiedene Böschungswinkel φ folgende Tabelle berechnet:

Böschungswinkel $\varphi =$	Wassertiefe $t =$	Breite der Kanalsohle $b =$	Benetzter Umfang $U =$	
90°	$0{,}707 \sqrt{F}$	$1{,}414 \sqrt{F}$	$2{,}828 \sqrt{F}$	für Holz
60°	$0{,}76 \sqrt{F}$	$0{,}877 \sqrt{F}$	$2{,}632 \sqrt{F}$	„ Futtermauern
45°	$0{,}74 \sqrt{F}$	$0{,}613 \sqrt{F}$	$2{,}704 \sqrt{F}$	„ Erde mit Uferdeckung
30°	$0{,}664 \sqrt{F}$	$0{,}536 \sqrt{F}$	$3{,}012 \sqrt{F}$	„ „ ohne „

Aufgabe 114. Ein Kanal ist mit einem Gefälle $J = \frac{h}{l} = \frac{1}{1500}$ angelegt und in Erde ausgeführt. Die Breite der Kanalsohle ist $= 3$ m, der Böschungswinkel $\varphi = 30^0$ und die Wassertiefe im Kanal $t = 1$ m. Es soll die Geschwindigkeit v und die in der Sekunde durchfließende Wassermenge Q berechnet werden.

Fig. 206.



Auflösung. Nach Fig. 206 ist:

$$AD = BC = \frac{1}{\sin 30^0} = 2 \text{ m}$$

$$AD_1 = BC_1 = \sqrt{2^2 - 1} = 1,732 \text{ m}$$

Danach wird:

$$F = (3 + 1,732) . 1 = 4,732 \text{ qm}$$

$$U = AD + DC + CB = 2 + 3 + 2 = 7 \text{ m}$$

$$\text{also: } R = \frac{F}{U} = \frac{4,732}{7} = 0,676$$

Durch Einsetzung in Gl. 264) ergibt sich bei $\alpha = 0,00028$, $\beta = 0,00035$ (für Erde):

$$c = \sqrt{\frac{1}{0,00028 + \frac{0,00035}{0,676}}} = 35,4$$

und nach Gl. 263):

$$v = 35,4 \sqrt{\frac{0,676}{1500}} = 0,752 \text{ m}$$

Die in der Sekunde durchfließende Wassermenge ist dann nach Gl. 262):

$$Q = 4,732 . 0,752 = \backsim 3,5 \text{ cbm.}$$

Aufgabe 115. Es soll ein Kanal von 2000 m Länge in Bruchstein angelegt werden, welcher in der Sekunde eine Wassermenge $Q = 4,8$ cbm bei einer Geschwindigkeit $v = 1,2$ m zu liefern im stande ist. Es soll der Kanalquerschnitt festgestellt und das erforderliche Gefälle berechnet werden.

Auflösung. Der Wasserquerschnitt ist nach Gl. 262) S. 180:

$$F = \frac{Q}{v} = \frac{4,8}{1,2} = 4 \text{ qm}$$

Nach Tabelle S. 181 ist für $\varphi = 60^0$:

die Wassertiefe: $t = 0,76 \sqrt{4} = 1,52$ m

die Breite der Kanalsohle: $b = 0,877 \sqrt{4} = 1,754$ m

der benetzte Umfang: $U = 2,632 \sqrt{4} = 5,264$ m

$$\text{Also: } R = \frac{4}{5,264} = 0,76$$

Setzt man diesen Wert und außerdem $\alpha = 0,00024$; $\beta = 0,00006$ (für Bruchstein) in Gl. 264) ein, so ergibt sich:

$$c = \sqrt{\frac{1}{0,00024 + \frac{0,00006}{0,76}}} = 55,9$$

Nach Gl. 263) S. 180 ist dann:

$$J = \frac{h}{l} = \frac{v^2}{c^2 R} = \frac{1,44}{3125 . 0,76} = \frac{1}{1650}$$

Die ganze Gefällhöhe des Kanals beträgt demnach:

$$h = \frac{2000}{1650} = \backsim 1,2 \text{ m}$$

§ 37.

Stoß des Wassers.

Unter dem Stoß eines Wasserstrahles versteht man das Aufprallen desselben auf eine rechtwinklig oder schief gegen seine Bewegung gerichtete Fläche, wobei das Wasser einen Teil seiner Geschwindigkeit verliert. Die getroffene Fläche kann sich dabei in Ruhe befinden oder selbst in Bewegung begriffen sein.

Der Stoß ist infolge der Unzusammendrückbarkeit des Wassers vollkommen unelastisch.

Wird mit m_1 die Masse eines stoßenden Wasserteilchens, mit M_2 die Masse der rechtwinklig getroffenen ebenen Fläche bezeichnet, so ist bei gleichgerichteten Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der Arbeitsverlust, den ein Wasserteilchen durch den Stoß erleidet, nach Gl. 204) S. 150:

$$a_2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 M_2}{m_1 + M_2} (v_1 - v_2)^2$$

Wegen Kleinheit von m_1 gegenüber M_2 kann der Nenner genügend genau $= M_2$ angenommen werden. Es wird dann:

$$a_2 = {}^1/_2\, m_1 (v_1 - v_2)^2$$

Der Arbeitsverlust für die ganze stoßende Wassermasse ist gleich der Summe der Arbeitsverluste der einzelnen Wasserteilchen und beträgt danach, wenn $\Sigma m_1 = M_1$ gesetzt wird:

$$\mathfrak{A}_2 = {}^1/_2\, M_1 (v_1 - v_2)^2$$

Diese Größe ist von der Differenz der lebendigen Kräfte des Wassers vor und nach dem Stoße in Abzug zu bringen, um die an die gestoßene Fläche abgegebene Arbeit L zu erhalten. Die Leistung des Stoßes ist daher:

$$L = \frac{M_1 v_1^2}{2} - \frac{M_1 v_2^2}{2} - \frac{1}{2} M_1 (v_1 - v_2)^2 = M_1 v_2 (v_1 - v_2)$$

oder, wenn die in der Sekunde zum Stoß gelangende Wassermenge mit Q, das Gewicht eines Kubikmeters Wassers mit γ (= 1000 kg) bezeichnet wird:

$$L = \gamma \frac{Q}{g} v_2 (v_1 - v_2) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 265)$$

Der vom Wasser auf die Fläche ausgeübte Druck P ergibt sich nach Gl. 21) S. 25 aus der Beziehung zwischen mechanischer Arbeit und lebendiger Kraft:

$$P v_2 = L = \gamma \frac{Q}{g} v_2 (v_1 - v_2)$$

zu:

$$P = \gamma \frac{Q}{g} (v_1 - v_2) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 266)$$

Für den Fall, daß die gestoßene Fläche sich in Ruhe befindet (v_2 = Null), wird:

$$P = \gamma \frac{Q}{g} v_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 267)$$

Ist F der Querschnitt der Fläche, so geht nach Einsetzung von:

$$Q = F v_1$$

Gleichung 267) über in:

$$P = 2 \gamma F \frac{v_1^2}{2g} = 2 \gamma F h \quad \ldots\ldots\ldots \quad 268)$$

Die Leistung des Stoßes wird nach Gl. 265) ein Maximum für:

$$v_2 = v_1 - v_2$$

oder:

$$v_2 = \frac{v_1}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 269)$$

und ergibt sich dann zu:

$$L_{max} = \gamma \frac{Q}{2} \frac{v_1^2}{2g} = \gamma \frac{Qh}{2} \quad \ldots\ldots \quad 270)$$

Erfolgt der Stoß nicht durch einen geschlossenen Wasserstrahl, sondern im offenen, unbegrenzten Wasser, so fällt der Druck P gegen die Fläche F kleiner aus, als in Gl. 268) angegeben. Es wird alsdann:

$$P = k \gamma F \frac{v_1^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 271)$$

worin k ein Erfahrungskoeffizient ist.

Für eine dünne, rechtwinklig gegen die Stromrichtung gehaltene, unbewegliche Platte ist: $k = 1,86$.

Bewegt sich dagegen die Platte in ruhendem Wasser mit der Geschwindigkeit v_1, so ist: $k = 1,25$.

Für ein in der Achsenrichtung sich bewegendes Prisma oder Zylinder von mäßiger Länge ist: . . . . $k = \frac{4}{3}$

für einen in der Querrichtung sich bewegenden Zylinder: . . . . $k = \frac{2}{3}$

für eine Kugel: . . . . $k = 0,55$

Abschnitt VI.

Die Lehre vom Gleichgewicht gasförmiger Körper (Aerostatik).

§ 38.

Allgemeine Gesetze.

Die Gesetze, welche bei dem Gleichgewicht der tropfbar flüssigen Körper abgeleitet wurden, nämlich:

1. Der auf eine Flüssigkeit ausgeübte Druck pflanzt sich nach allen Richtungen gleichmäßig fort (§ 28 S. 156);

2. Der Druck einer Flüssigkeit auf eine Fläche ist gleich dem Gewichte der auf dieser Fläche ruhenden Flüssigkeitssäule (§ 30 S. 162);
3. Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper verliert an Gewicht so viel, als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit beträgt (§ 31 S. 164);
4. Die Höhen zweier Flüssigkeitssäulen über der Trennungsfläche derselben in den Schenkeln zusammenhängender Röhren verhalten sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte der Flüssigkeiten (§ 32 S. 168);

gelten auch für die gasförmigen oder elastischen Flüssigkeiten. Es treten aber, hauptsächlich verursacht durch die Fähigkeit der gasförmigen Körper, sich verhältnismäßig leicht zusammendrücken zu lassen, bei diesen zum Teil ganz andere Erscheinungen auf als bei den tropfbar flüssigen Körpern.

Infolge des Bestrebens der gasförmigen Körper, sich immer weiter auszudehnen, übt eine Gasmasse auf die Wände eines Gefäßes, in welchem sie eingeschlossen ist, einen Druck aus, den man Spannkraft oder Expansivkraft nennt. Im Vergleich zu dieser Kraft ist der Druck, welchen das Gas infolge seiner Schwere auf die Gefäßwände ausübt, so unmerklich klein, daß er vernachlässigt werden kann.

§ 39.

Druck der atmosphärischen Luft. Barometer. Manometer.

Die Größe der Spannkraft eines Gases gibt man entweder durch ein Gewicht an, welches auf die Flächeneinheit einen ebenso großen Druck ausübt als das Gas; oder durch die Höhe einer Flüssigkeitssäule (Quecksilber oder Wasser), welche in dem einen oben geschlossenen Schenkel zusammenhängender Röhren dem Drucke des Gases auf die Oberfläche der Flüssigkeit in dem anderen Schenkel das Gleichgewicht hält.

Fig. 207.

76 cm

Füllt man (Fig. 207) eine an einem Ende zugeschmolzene Glasröhre, deren Länge größer als 76 cm sein muß (sonst aber beliebig sein kann), mit Quecksilber, verschließt dann das offene Ende z. B. mit dem Finger, kehrt die Röhre um, taucht das verschlossen gehaltene Ende in ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß und zieht den Finger zurück, so bleibt in der Glasröhre eine Quecksilbersäule von etwa 76 cm über der Oberfläche des Quecksilbers in dem Gefäße stehen, und über dieser Quecksilbersäule befindet sich in der Glasröhre ein luftleerer Raum. (Versuch von Torricelli.)

Eine solche Einrichtung, mit Einteilung versehen, so daß man die Höhe der Quecksilbersäule ablesen kann, heißt Barometer (Schweremesser); die Höhe der Quecksilbersäule nennt man den Barometerstand.

Die Quecksilbersäule von rund 76 cm Höhe wird durch den Druck der atmosphärischen Luft auf die freie Oberfläche des Quecksilbers im Gleichgewicht gehalten. Da nun das spezifische Gewicht des Quecksilbers = 13,59 ist, so hat danach der Luftdruck auf ein Quadratzentimeter die Größe:

$$p_0 = 76 \,.\, 13{,}59 = 1033 \text{ g}$$

oder:

$$p_0 = 1{,}033 \text{ kg}$$

Diese Größe ist je nach der Höhe des Ortes veränderlich; außerdem auch noch abhängig von der geographischen Breite, von dem Wärmezustand und dem Feuchtigkeitsgehalte der Luft und wird bei Druckbestimmungen unter dem Namen Atmosphäre als Einheit angenommen.

Da eine Quecksilbersäule von 0,76 m Höhe im Gleichgewichte gehalten wird durch eine Wassersäule von: 0,76 . 13,59 = 10,33 m, so läßt sich der Atmosphärendruck auch erklären als:

der Druck einer Quecksilbersäule von 0,76 m Höhe

oder:

der Druck einer Wassersäule von 10,33 m Höhe.

Anstatt dieser sog. physikalischen Atmosphäre hat man bei Rechnungen, wie solche in der technischen Mechanik vorkommen, den Begriff der technischen oder metrischen Atmosphäre als Einheit eingeführt, und man versteht hierunter:

den Druck von 1 kg auf 1 qcm.

Es ergibt sich daher folgende Zusammenstellung:

1 physikalische (alte) Atm. p_0 = 1,033 kg/qcm.
= 76 cm Quecksilbersäule (von 0°)
= 10,33 m Wassersäule (von 4°) . . 272)

1 technische (neue) Atm. p_0 = 1 kg/qcm.
= 73,55 cm Quecksilbers. (von 0°)
= 10 m Wassersäule (von 4°) . . 273)

Das Manometer, welches dazu dient, den Druck von Gasen und Dämpfen zu messen, unterscheidet sich von dem Barometer im Grundgedanken nur dadurch, daß auf die Oberfläche des Quecksilbers im Gefäße nicht der Druck der freien Atmosphäre wirkt, sondern die Spannkraft p des in dem Behälter A eingeschlossenen Gases oder Dampfes (Fig. 208).

Das Hebermanometer (Fig. 209) besteht aus einer zum Teil mit

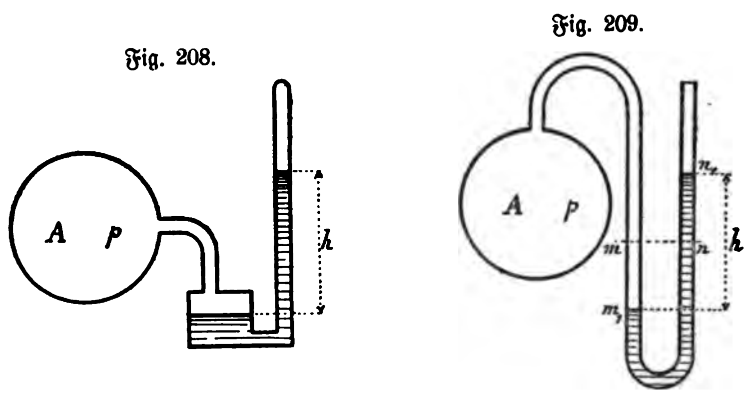


Fig. 208. Fig. 209.

Quecksilber angefüllten gebogenen Röhre, deren einer Schenkel oben offen ist, während der andere Schenkel mit dem Gasbehälter A in Verbindung steht.

Ist der Druck im Behälter A gleich dem Druck der äußeren Luft, so liegt der Quecksilberspiegel in beiden Schenkeln in einer Wagerechten m n. Vergrößert sich nun die Spannung des Gases im Behälter, so sinkt das Quecksilber in dem einen Schenkel der Röhre um das Maß mm_1 und steigt zugleich in dem anderen Schenkel um das Maß nn_1.

Der Überdruck des Gases über den Druck der äußeren atmosphärischen Luft wird daher gemessen durch die Quecksilbersäule von der Höhe:

$$h = mm_1 + nn_1$$

Bei größeren Drücken würden jedoch solche Quecksilbermanometer sehr hoch ausgeführt werden müssen; anstatt dessen verwendet man dann Metallmanometer (Federmanometer).

Aufgabe 116. Wie groß, in (physikalischen) Atmosphären ausgedrückt, ist der Druck auf den Kolben einer Pumpe, über welchem eine Wassersäule von 50 m steht?

Auflösung.

$$p = \frac{50}{10{,}33} = 4{,}84 \text{ Atm. } (= 5 \text{ kg/qcm.})$$

Aufgabe 117. Der Kolben eines Kraftsammlers (Akkumulators) von 25 cm Durchmesser ist beschwert durch ein Gewicht von 200000 kg. Wieviel (technische) Atmosphären Druck werden dadurch erzeugt?

Auflösung. Die Kolbenfläche ist:

$$F = \frac{d^2\,\pi}{4} = \frac{25^2 \,.\, 3{,}14}{4} = 491 \text{ qcm}$$

Folglich:

$$p = \frac{200\,000}{491} = \backsim 407 \text{ Atm. } (= 407 \text{ kg/qcm})$$

Aufgabe 118. Welche Höhe muß eine Weingeistsäule (spez. Gewicht = 0,8) haben, um einer 0,76 m hohen Quecksilbersäule (spez. Gewicht = 13,59) das Gleichgewicht zu halten?

Auflösung.

$$h = 0{,}76 \,.\, \frac{13{,}59}{0{,}8} = 12{,}91 \text{ m}$$

Aufgabe 119. An einem Gasbehälter A ist ein mit Quecksilber gefülltes Hebermanometer (Fig. 209) angebracht, bei welchem man h = 45,6 cm mißt. Wie groß ist der Gasdruck p im Behälter (in techn. Atm. Überdruck)?

Auflösung.

$$p = \frac{45{,}6}{73{,}55} = 0{,}62 \text{ Atm. Überdruck } (= 0{,}62 \text{ kg/qcm}).$$

§ 40.

Die Gesetze von Mariotte und Gay-Lussac.

Bei gleicher Temperatur ist der Rauminhalt einer Gasmasse umgekehrt verhältnisgleich dem Drucke, welchen dieselbe auf die einschließenden Gefäßwände ausübt. (Gesetz von Mariotte.)

Es sei V der Rauminhalt und p der Druck einer bestimmten Gasmasse. Denkt man sich dieselbe auf den Raum V_1 zusammengepreßt, und wird der diesem kleineren Rauminhalte entsprechende Druck mit p_1 bezeichnet, so ist nach dem obigen Gesetze:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{p_1}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 274)$$

Bei gleichem Druck ist die Vergrößerung des Rauminhalts einer Gasmasse verhältnisgleich der Temperaturzunahme. (Gesetz von Gay-Lussac.)

Es sei V_0 der der Temperatur Null entsprechende Rauminhalt einer Gasmasse, in welcher der Druck p stattfindet. Wird dann bei unverändertem Drucke die Temperatur auf t^0 erhöht, so vergrößert sich der Rauminhalt von V_0 auf V und es ist:

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha t$$

oder:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 275)$$

worin für den Ausdehnungskoeffizienten α einzusetzen ist:*)

$$\alpha = 0{,}00367 = \frac{1}{273} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 276)$$

Bringt man ein anderes Mal dieselbe Gasmasse bei dem gleichen Druck p auf die Temperatur ${t^0}_1$, so wird der Rauminhalt:

$$V_1 = V_0(1 + \alpha t_1)$$

Durch Division der Ausdrücke für V und V_1 erhält man:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 277)$$

Die Vereinigung der Gesetze von Mariotte und Gay-Lussac gibt die Beziehung zwischen Rauminhalt, Druck und Temperatur zweier gleicher Gasmassen, bei denen sowohl der Druck als auch die Temperatur verschieden ist. Vergleicht man beide Gasmassen mit einer dritten Gasmasse, welche mit der ersteren gleichen Druck, mit der zweiten gleiche Temperatur zeigt, so erhält man folgende Zusammenstellung:

	Rauminhalt	Temperatur	Druck
Gasmasse 1.	V	t	p
„ 2.	V_1	t_1	p_1
„ 3.	V_2	t_1	p

Für die Gasmassen 1 und 3 folgt nach dem Gay-Lussacschen Gesetze (Gl. 277):

*) Der Ausdehnungskoeffizient α für die verschiedenen Gase ist (streng genommen) nicht konstant; der oben angegebene Wert $\alpha = \frac{1}{273}$ gilt für Luft, kann aber auch als Mittelwert für Gase im allgemeinen gewählt werden.

$$\frac{V}{V_2} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1}$$

Für die Gasmassen 2 und 3 ergibt sich nach dem Mariotteschen Gesetze (Gl. 274):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p}$$

Durch Multiplikation beider Ausdrücke erhält man:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{p_1}{p} \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1}$$

oder, wenn man Zähler und Nenner durch α dividiert und nach Gl. 276) $\alpha = \frac{1}{273}$ einsetzt:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{p_1}{p} \frac{273 + t}{273 + t_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 278)$$

Da die Gasmassen als gleich vorausgesetzt wurden, so sind auch deren Gewichte gleich; also:

$$V\gamma = V_1\gamma_1 \text{ oder: } \frac{V}{V_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma}$$

worin γ und γ_1 die Gewichte der Kubikeinheit bedeuten. Also auch nach Gl. 278):

$$\frac{\gamma_1}{\gamma} = \frac{p_1}{p} \frac{273 + t}{273 + t_1}$$

oder:

$$\frac{p}{\gamma(273 + t)} = \frac{p_1}{\gamma_1(273 + t_1)} \quad \ldots\ldots \quad 279)$$

Gl. 279) kann nun zur Vergleichung verschieden großer Gasmassen benutzt werden, weil darin die von den Massen abhängigen Rauminhalte nicht mehr vorkommen.

Die Werte: $273 + t$ bezw. $273 + t_1$ bezeichnet man als die sog. absoluten Temperaturen T und T_1. Die Gl. 277) bis 279) lassen sich dann in folgender einfacherer Form schreiben:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{T}{T_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 277\text{a})$$

$$\frac{V}{V_1} = \frac{p_1}{p} \frac{T}{T_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 278\text{a})$$

$$\frac{p}{\gamma T} = \frac{p_1}{\gamma T_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 279\text{a})$$

Wird der Rauminhalt, den 1 kg irgend eines Gases bei einem bestimmten Drucke p_0 und bei 0^0 Temperatur einnimmt, mit V_0 bezeichnet, so folgt aus Gl. 278):

$$pV = p_0 V_0 \cdot \frac{273 + t}{273}$$

Der Wert: $\frac{p_0 V_0}{273}$ ist für jedes Gas eine bestimmte Größe und wird mit R bezeichnet (sog. Gaskonstante); also:

$$pV = R\,(273 + t)$$

oder nach Einführung der absoluten Temperatur T ergibt sich die allgemeine Zustandsgleichung der Gase:

$$pV = RT \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 280)$$

Durch Anwendung der Gl. 280) auf irgend einen bestimmten Zustand p, V und T läßt sich R bestimmen.

Z. B.: der Druck der atmosphärischen Luft an der Meeresoberfläche hat bei mittlerem Barometerstande und bei der Temperatur t_0 = Null (also $T_0 = 273$) für ein Quadratmeter die Größe (vergl. Gl. 272, S. 186):

$$p_0 = 10\,333 \text{ kg}$$

und das Gewicht eines Kubikmeters derselben ist:

$$\gamma_0 = \frac{1}{V_0} = 1{,}293 \text{ kg} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 281)$$

Durch Einsetzung dieser Werte in Gl. 280) ergibt dann sich für atmosphärische Luft:

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{10\,333}{1{,}293 \cdot 273} = 29{,}27 \quad \ldots\ldots \quad 282)$$

Aufgabe 120. Bei einer Dampfmaschine erhalte der Kolben nur während $^1/_5$ des Hubes (20% Füllung) frischen Dampf von der Spannung p und werde dann durch die Spannkraft des Dampfes weiter bewegt. Wie groß ist die Dampfspannung p_1 am Ende des Hubes unter Annahme unveränderter Temperatur?

Auflösung. Wird der Hub mit h, der Durchmesser des Zylinders mit D bezeichnet, so sind die den Drücken p und p_1 entsprechenden Rauminhalte:

$$V = \frac{D^2\pi}{4}\,\frac{h}{5} \text{ bezw. } V_1 = \frac{D^2\pi}{4}\,h$$

Also:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{1}{5}$$

Folglich nach Gl. 274):

$$p_1 = p\,\frac{V}{V_1} = \frac{1}{5}\,p$$

z. B.: Für eine Anfangsspannung des Dampfes von p = 6 Atm. Überdruck = 7 Atm. absolute Spannung würde sich die Endspannung ergeben zu:

$$p_1 = \frac{7}{5} = 1{,}4 \text{ Atm. bezw.} = 0{,}4 \text{ Atm. Überdruck.}$$

Aufgabe 121. Bei einer Hochofenanlage habe das Kaltwindrohr (das Rohr, welches den Wind von den Gebläsen nach den Winderhitzern führt) den Durchmesser D_1; das Heißwindrohr (das Rohr, welches den Wind von den Winderhitzern zum Hochofen führt) den Durchmesser D. In welchem Verhältnis müssen die Durchmesser D und D_1 zu einander stehen, wenn die Temperatur des kalten Windes = 15°, die des

erhitzten = 700° ist, und wenn die Windgeschwindigkeit in beiden Rohrleitungen die gleiche sein soll?

Auflösung. Bei der Windgeschwindigkeit v ist der Rauminhalt der in der Sekunde durchströmenden Windmenge

$$\text{in dem Kaltwindrohre: } V_1 = \frac{D_1^2 \pi}{4} v$$

$$\text{„ „ Heißwindrohre: } V = \frac{D^2 \pi}{4} v$$

Folglich:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{D^2}{D_1^2}$$

oder nach Gl. 277) bezw. Gl. 277a):

$$\frac{D}{D_1} = \sqrt{\frac{273 + 700}{273 + 15}} = 1,84$$

Der Durchmesser des Heißwindrohres muß also 1,84 mal so groß sein als der Durchmesser des Kaltwindrohres.

Aufgabe 122. Wie viel wiegt ein Kubikmeter atmosphärische Luft bei einer Temperatur von 80° und bei normalem Luftdruck?

Auflösung. Durch Einsetzung von $T = 273 + 80$ und $p = 10333$ in Gl. 282) ergibt sich:

$$V = \frac{1}{\gamma} = \frac{R \cdot T}{p} = \frac{29,27 \cdot 353}{10333} = 1$$

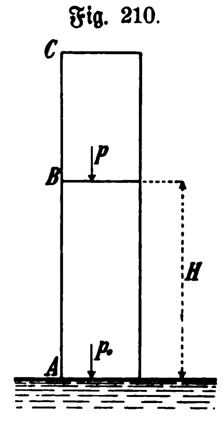
also: $\gamma = 1$ kg.

§ 41.

Barometrische Höhenmessung.

Der Luftdruck in der Atmosphäre nimmt mit der Höhe ab, weil auf die unteren Schichten höhere Luftsäulen drücken als auf die oberen. Betrachtet man einen vom Meeresspiegel bis zu der Grenze der Atmosphäre reichenden Luftzylinder vom Querschnitt 1 (Fig. 210), so ist der Druck p_0 am Meeresspiegel gleich dem Gewichte der ganzen Säule AC; der Druck p in der Höhe H gleich dem Gewichte der Säule BC.

Fig. 210.



Da nun der Druck auf das Quecksilber des Barometers von dem Gewichte der darüber befindlichen Luftsäule herrührt, so verhalten sich die Barometerstände wie die Luftdrücke. Der Barometerstand ist daher abhängig von der Höhe des Ortes über dem Meeresspiegel und um so kleiner, je höher der Ort liegt. Man erhält dadurch ein Mittel, den Höhenunterschied zweier Orte durch das Barometer zu bestimmen.

Am Meeresspiegel und bei 0° Temperatur wiegt 1 cbm Quecksilber 13590 kg; 1 cbm Luft 1,293 kg; folglich ist die Luft $\frac{13590}{1,293} = \sim 10500$mal so leicht

als Quecksilber. Eine Quecksilbersäule von 1 mm Höhe wird daher im Gleichgewichte gehalten durch eine Luftsäule von 10500 mm = 10,5 m Höhe. Das Barometer, welches am Meeresspiegel 760 mm zeigt, wird also, wenn man es um 10,5 m hebt, auf 759 mm fallen.

Da aber die Dichtigkeit der Luft mit der Höhe abnimmt, so wird das Barometer nicht in demselben Verhältnis fallen, in welchem es höher gebracht wird. Außerdem übt die Temperatur Einfluß aus. Bei genauen Bestimmungen sind wegen des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft, wegen der Abnahme der Schwere mit der Höhe und wegen der verschiedenen Größe der Schwere in verschiedenen Breitengraden noch besondere Berichtigungen anzubringen. Für mittlere deutsche Verhältnisse kann die Annäherungsformel benutzt werden:

$$H = 18400\,(\log B - \log b) \quad \ldots\ldots \quad 283)$$

worin H den Höhenunterschied zweier Orte in Metern; B und b die Barometerstände am unteren bezw. oberen Orte bedeuten.

Aufgabe 123. An zwei Orten sind die Barometerstände B = 740 mm und b = 640 mm gleichzeitig beobachtet. Wie groß ist der Höhenunterschied derselben?

Auflösung.

$$\log B = 2{,}86923$$
$$\log b = 2{,}80618$$
$$\log B - \log b = 0{,}06305$$

Folglich nach Gl. 283):

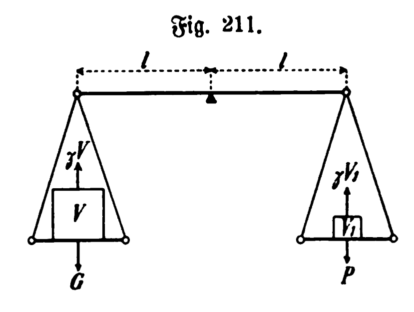
$$H = 18400 \,.\, 0{,}06305 = 1160 \text{ m}$$

§ 42.

Auftrieb der Luft. Steigkraft und Steighöhe des Luftballons.

Jeder in der Luft befindliche Körper verdrängt eine Luftmasse von gleichem Rauminhalte und erleidet infolgedessen einen Auftrieb, dessen Größe gleich dem Gewichte der verdrängten Luft ist. Der Druck, welchen der Körper auf seine Unterlage ausübt, ist also nicht das wirkliche Gewicht desselben, sondern der Überschuß des wirklichen Gewichtes über den Auftrieb der atmosphärischen Luft.

Fig. 211.



Ist G das **wirkliche**, P das **scheinbare** Gewicht des Körpers, ferner V sein Rauminhalt und V_1 der Rauminhalt des Gewichtstückes, so ist bei einer gleicharmigen Wage (Fig. 211), wenn γ das Gewicht von 1 cbm Luft bedeutet:

$$G - \gamma V = P - \gamma V_1$$

oder:

$$\mathbf{G = P + \gamma(V - V_1)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 284)$$

Das wirkliche Gewicht eines Körpers ist nur dann gleich seinem scheinbaren Gewichte, wenn Körper und Gewichtstück gleichen Rauminhalt haben.

Ein Körper, dessen Gewicht **geringer** ist als der Auftrieb der atmosphärischen Luft, wird durch eine Kraft P **aufwärts** getrieben, welche gleich ist dem Ueberschuß des Auftriebs A über das Gewicht G des Körpers; also:

$$\mathbf{P = A - G} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 285)$$

Hiernach kann z. B. die **Steigkraft** eines **Luftballons** (Fig. 212) berechnet werden. Ist V der Rauminhalt des Ballons, γ das Gewicht von 1 cbm Luft am Boden, γ' das Gewicht von 1 cbm Gas, mit dem der Ballon gefüllt ist, G das Gewicht der Ballonhülle samt Zubehör und Belastung, so ergibt aus Gl. 285) die Steigkraft des Ballons am Boden:

$$\mathbf{P = V\,(\gamma - \gamma') - G} \quad \ldots\ldots \quad 286)$$

Der Ballon wird so lange in die Höhe steigen, bis er in eine Luftschicht kommt von so geringem Gewichte (γ_1 für ein Kubikmeter), daß die verdrängte Luftmasse sein **Gesamtgewicht** nicht mehr übertrifft, also P = Null ist. Aus Gl. 286) folgt dann:

$$0 = V\,(\gamma_1 - \gamma') - G$$

oder:

$$\gamma_1 = \gamma' + \frac{G}{V} \quad \ldots\ldots \quad 287)$$

Fig. 212.

Da sich die Gewichte γ und γ_1 für ein Kubikmeter verhalten wie die Luftdrücke, diese aber nach § 41 wie die Barometerstände, so ergibt sich die **Steighöhe** des Ballons nach Gl. 283) S. 192 zu:

$$\mathbf{H = 18\,400\,(\log \gamma - \log \gamma_1)} \quad \ldots \quad 288)$$

Aufgabe 124. Ein Stück Kork, dessen Rauminhalt V = 0,42 cbm betrug, wurde auf einer gleicharmigen Wage von einem gußeisernen Gewichtstück P = 100 kg im Gleichgewichte gehalten. Wie groß ist das **wirkliche** Gewicht des Korkstückes?

Auflösung. Nimmt man das spezifische Gewicht des Gußeisens zu 7,25 an, so ist (da 1 cbm Gußeisen 7250 kg wiegt) der Rauminhalt des Gewichtstückes:

$$V_1 = \frac{100}{7250} = \backsim 0{,}014 \text{ cbm}$$

Folglich:

$$V - V_1 = 0{,}42 - 0{,}014 = 0{,}406 \text{ cbm}$$

Rechnet man nach Gl. 281) S. 190 1 cbm Luft zu rund 1,3 kg, so ergibt sich nach Gl. 284):

$$G = 100 + 1,3 \,.\, 0,406 = 100,53 \text{ kg}$$

Aufgabe 125. Ein mit Leuchtgas gefüllter Luftballon habe den Rauminhalt V = 1800 cbm; das Gewicht desselben samt Zubehör und Belastung sei G = 800 kg. Es soll die Steigkraft P des Ballons am Boden und die Steighöhe H berechnet werden ($\gamma = 1,3$ für Luft; $\gamma' = 0,52$ für Leuchtgas).

Auflösung. Nach Gl. 286) ist die Steigkraft:

$$P = 1800\,(1,3 - 0,52) - 800 = \sim 600 \text{ kg}$$

1 cbm Luft am oberen Ende der Steighöhe wiegt nach Gl. 287):

$$\gamma_1 = 0,52 + \frac{800}{1800} = 0,96 \text{ kg.}$$

Folglich Steighöhe H nach Gl. 288):

$$H = 18400\,(\log 1,3 - \log 0,96) = \sim 2423 \text{ m.}$$

§ 43.

Anwendungen des Luftdruckes.

1. Der Heber (Fig. 213).

Ein vorher luftleer gemachtes gekrümmtes Rohr a b c (ein sogen. Heber) wird mit dem einen kürzeren Schenkel in ein mit Wasser gefülltes Gefäß A getaucht, während das Ende c des anderen längeren Schenkels geschlossen gehalten wird. Vermöge des Atmosphärendrucks steigt dann das Wasser in dem kürzeren Schenkel bis zu der Höhe $h_0 = 10,33$ m über dem Wasserspiegel des Gefäßes empor oder fließt, wenn die höchste Stelle b des Hebers um weniger als 10,33 m vom Wasserspiegel absteht, in den längeren Schenkel über. Wird das Rohr bei c geöffnet, so wird das Wasser dort ausfließen und zwar mit um so größerer Geschwindigkeit, je tiefer der Punkt c unter dem Wasserspiegel liegt. Das Gefäß kann auf diese Weise gänzlich entleert werden, wenn das Rohrende a bis auf den Gefäßboden gesenkt wird.

Fig. 213.

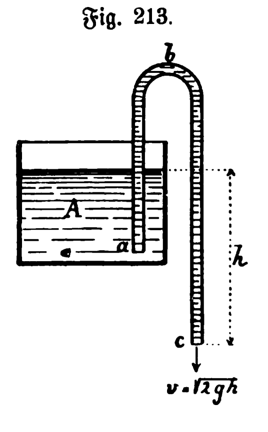
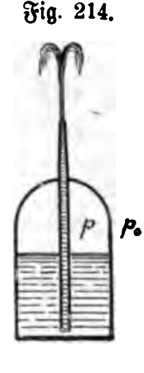


Fig. 214.



2. Der Heronsball (Fig. 214).

Dieser besteht aus einem luftdicht verschlossenen Gefäße, in welchem sich ein Rohr befindet, das unten bis nahe an den Boden des Gefäßes reicht und oben mit einem verjüngten Mundstück versehen ist. Wird das Gefäß bis zu einer beliebigen Höhe mit Wasser gefüllt, und die über dem Wasser befindliche Luft auf irgend eine Art (z. B. durch Einblasen mit dem Munde) verdichtet, so wird vermöge des Überdrucks der inneren verdichteten Luft über die äußere das Wasser in dem Rohre emporgetrieben und spritzt durch das Mundstück in einem Strahle aus. (Der Heronsball findet unter dem Namen Windkessel vielfache Anwendung.)

3. Die Saugpumpe (Hubpumpe Fig. 215).

Dieselbe besteht aus dem Pumpen-Zylinder A, in dem sich ein mit einem Ventil a versehener, luftdicht schließender Kolben vermittelst der Kolbenstange C auf und nieder bewegen läßt, und aus dem Saugrohre B, welches bis unter den Spiegel des zu hebenden Wassers reicht. Zwischen Zylinder und Saugrohr befindet sich ein zweites, sogen. Bodenventil b; beide Ventile öffnen sich nur nach oben. Wird der Kolben von der tiefsten Stellung aus gehoben, so entsteht unter demselben eine Luftleere; infolgedessen öffnet sich das Ventil b, während das Ventil a, auf welches von oben der Luftdruck wirkt, geschlossen ist. Die Luft verdünnt sich dabei im Zylinder und im Saugrohre, und das Wasser wird in letzterem etwas emporsteigen. Beim Niedergange des Kolbens schließt sich das Ventil b, während sich a öffnet; die Luft bleibt daher im Saugrohre verdünnt und wird beim nächsten Aufgange des Kolbens, wobei wieder b offen, a geschlossen ist, noch weiter verdünnt, so daß das Wasser höher aufsteigt.

Fig. 215.

Je mehr nun beim abwechselnden Auf- und Niedergange des Kolbens die Luft in dem Saugrohre verdünnt wird, um so höher wird das Wasser in demselben durch den äußeren Luftdruck getrieben; gelangt schließlich in den Pumpenzylinder und sodann beim Niedergange des Kolbens über das Ventil a, so daß es beim nächsten Aufgange des Kolbens bis zum Ausgußrohr E gehoben wird und dort abfließt.

Da der atmosphärische Druck einer Wassersäule von $h_0 = 10{,}33$ m das Gleichgewicht hält, so kann die Pumpe nur dann wirksam sein, wenn die Höhe des Ventils a in der höchsten Stellung des Kolbens über dem Unterwasserspiegel kleiner als 10,33 m ist. Praktisch geht man kaum über 7 bis 8 m hinaus.

Bezeichnet man die Kolbenfläche mit F, die augenblickliche Höhe des

Ventils a über dem Wasserspiegel mit h, unter dem Ausgußrohr mit h_1, so ist der von oben nach unten auf den Kolben wirkende Druck:

$$P_1 = p_0 F + \gamma h_1 F$$

Der von unten nach oben auf den Kolben ausgeübte Druck ist:

$$P_2 = p_0 F - \gamma h F$$

Folglich beträgt die zum Heben des Kolbens erforderliche Kraft (ohne Berücksichtigung der Bewegungswiderstände):

$$P = P_1 - P_2 = p_0 F + \gamma h_1 F - p_0 F + \gamma h F$$

oder:

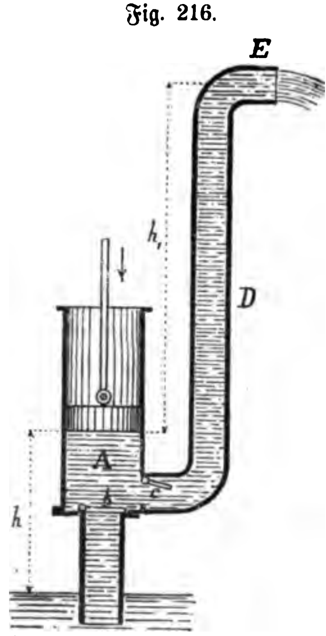
$$\mathbf{P = \gamma F (h + h_1) = \gamma F H} \quad \ldots\ldots \quad 289)$$

wenn mit H die gesamte Förderhöhe, d. h.: Abstand von Unterwasser- bis Oberwasserspiegel bezeichnet wird.

4. Die Druckpumpe (Fig. 216).

Diese unterscheidet sich von der Saugpumpe dadurch, daß der Kolben kein Ventil hat; statt dessen ist das unten am Pumpenzylinder A angebrachte Steigrohr (Druckrohr) D mit einem Ventil versehen. Man nennt b das Saugventil, c das Druckventil.

Fig. 216.



Nachdem das Wasser durch das Saugventil b bis in den Zylinder getreten ist, wird es beim Niedergange des Kolbens, wobei b geschlossen, c geöffnet ist, in dem Druckrohre D bis zu dem Ausgußrohre E emporgetrieben.

Die zum Heben des Kolbens erforderliche Kraft ergibt sich in ähnlicher Weise wie unter 3., wenn wieder mit F die Kolbenfläche bezeichnet wird, nach Fig. 216 zu:

$$\mathbf{P = \gamma F h} \quad \ldots\ldots \quad 290)$$

Beim Niedergange des Kolbens ist eine Wassersäule von der Höhe h_1 zu heben; die dazu erforderliche Kraft ist:

$$\mathbf{P' = \gamma F h_1} \quad \ldots\ldots \quad 291)$$

Die Länge des Saugrohres einschließlich Kolbenhub darf auch hier theoretisch 10,33 m nicht überschreiten. Die Länge des Druckrohres kann beliebig angenommen werden; es ist dabei nur zu berücksichtigen, daß die zum Heben der Wassersäule erforderliche Kraft P′ in gleichem Verhältnis mit der Höhe derselben zunimmt.

Außer der beschriebenen einfach wirkenden Druckpumpe, bei welcher nur Wasser während des Niederganges des Kolbens gefördert wird, kommen auch doppelt wirkende (mit 4 Ventilen) vor; diese

liefern Wasser sowohl beim Aufgang als auch beim Niedergang des Kolbens. Häufig werden jedoch in der Praxis zwei gekuppelte, einfach wirkende Pumpen einer doppelt wirkenden vorgezogen.

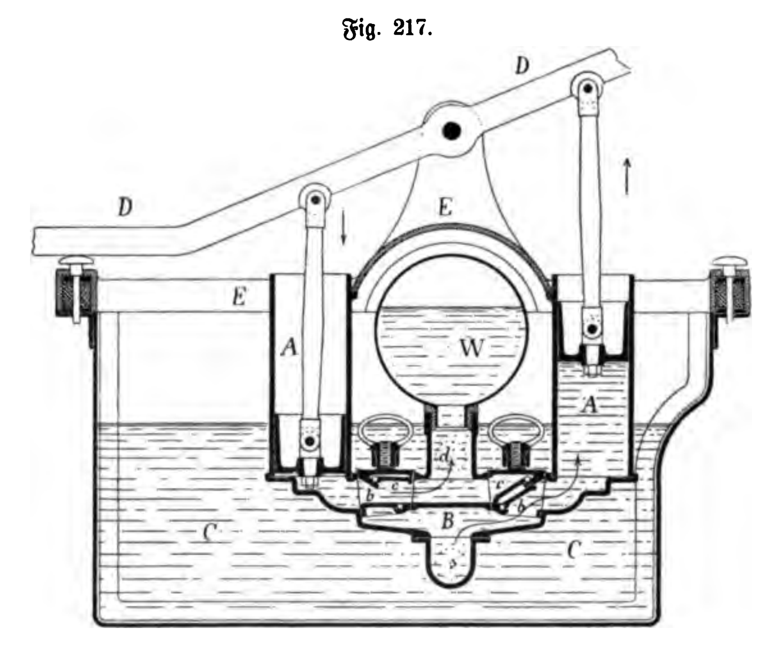
5. Die Feuerspritze (Fig. 217).

Dieselbe besteht aus zwei einfach wirkenden Druckpumpen A, welche durch das Ventilgehäuse B miteinander verbunden sind, und deren Kolben eine abwechselnde Bewegung ausführen. Während der eine Kolben aufsteigt, geht gleichzeitig der andere nieder. Beim Aufsteigen des einen Kolbens (Fig. 217 rechts) gelangt das Wasser aus dem Saugrohr s durch das geöffnete Ventil b in den Pumpenzylinder A, während Ventil c geschlossen ist. Beim Niedergange des Kolbens (Fig. 217 links) schließt sich Ventil b, und das Wasser wird durch das geöffnete Ventil c in das Druckrohr d bezw. in den Windkessel W getrieben.

Die ganze Pumpenanordnung befindet sich innerhalb des Wasserkastens C und ist vermittelst Schrauben an dem über dem Wasserkasten angebrachten Träger E aufgehängt. Am Träger ist ebenfalls der Druckbaum D gelagert.

Bei fortgesetztem Pumpen wird das Wasser in den außen am Druckrohr d befestigten Spritzenschlauch gepreßt und tritt in einem kräftigen Strahle aus dem Mundstück desselben aus. Gleichzeitig steigt das Wasser im Windkessel empor, wodurch die in demselben befindliche Luft stark zusammengepreßt wird.

Fig. 217.



Der Zweck des Windkessels besteht darin, daß das Wasser bei jedem Niedergange des einen oder anderen Kolbens nicht stoßweise, sondern in einem

stetigen Strahle ausgetrieben wird, da die zusammengepreßte Luft einen gleichmäßigen Druck auf das Wasser im Windkessel ausübt. Gewöhnlich wird der Inhalt des Windkessels gleich dem vier- bis fünffachen Inhalt eines Pumpenzylinders gemacht.

Die bei einer Feuerspritze gegebenen Größen sind die Strahlhöhe H, die in der Sekunde zu liefernde Wassermenge Q und die Hubhöhe s, sowie die Geschwindigkeit C des Angriffspunktes der an den Druckbäumen arbeitenden Mannschaft.

Würde der aus dem Mundstück mit der Geschwindigkeit v austretende Wasserstrahl im luftleeren Raume emporsteigen, so wäre die theoretische Strahlhöhe:

$$H' = \frac{v^2}{2g}$$

Wegen des Luftwiderstandes ist die wirklich erreichte Strahlhöhe H für mittlere Verhältnisse nur etwa $^4/_5$ so groß; also $H' = {}^5/_4 H$. Danach erhält man aus der letzten Gleichung für v:

$$v = \sqrt{2g \,.\, {}^5/_4 H} = 4{,}95 \sqrt{H} \quad \ldots\ldots \quad 292)$$

Der Durchmesser d des Mundstückes folgt dann aus:

$$\frac{d^2\pi}{4} v = \frac{d^2\pi}{4} 4{,}95 \sqrt{H} = Q \quad \ldots\ldots \quad 293)$$

Bei m-facher Übersetzung des Druckhebels ist die Geschwindigkeit des Pumpenkolbens:

$$c = \frac{C}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 294)$$

und der Kolbenhub:

$$h = \frac{s}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 295)$$

Der Durchmesser D des Kolbens ergibt sich aus der Bedingung:

$$\frac{D^2\pi}{4} c = \frac{d^2\pi}{4} v \quad \ldots\ldots\ldots \quad 296)$$

Wird die am Druckbaume ausgeübte Kraft mit P bezeichnet, so leistet die Mannschaft in der Sekunde die Arbeit:

$$\mathfrak{A} = P\,C$$

Die Arbeit, welche erforderlich ist, die Wassermenge Q auf die (theoretische) Höhe $H' = {}^5/_4 H$ zu heben, ist:

$$\mathfrak{A}_1 = 1000\, Q\, {}^5/_4 H$$

Folglich ist bei dem Güteverhältnis η:

$$\mathfrak{A} = \frac{1}{\eta} \,.\, \mathfrak{A}_1$$

oder:

$$PC = \frac{1}{\eta} 1000 Q\, {}^5/_4 H \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 297)$$

woraus sich die erforderliche Kraft P berechnen läßt.

Bei Anwendung von Schläuchen ist auf den Röhrenwiderstand Rücksicht zu nehmen, der berechnet werden kann nach Gl. 254) S. 178, worin aber der Koeffizient 0,024 zu ersetzen ist durch 0,04. Ist l die Länge, d_1 der Durchmesser des Schlauches und v_1 die Geschwindigkeit des Wassers in demselben, so ist die zu überwindende Widerstandshöhe:

$$h_1 = 0{,}04 \frac{l}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 298)$$

und man erhält statt Gl. 297):

$$PC = \frac{1}{\eta} 1000 Q ({}^5/_4 H + h_1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 299)$$

Der Druck im Windkessel in Atmosphären oder in kg/qcm ist:

$$p = \frac{{}^5/_4 H + h_1}{h_0} = \frac{{}^5/_4 H + h_1}{10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 300)$$

6. Die Luftpumpe (Fig. 218).

Sie dient vorzugsweise zum Verdünnen der Luft, kann aber auch zum Verdichten derselben benützt werden. Die Hauptbestandteile der Luftpumpe sind: 1. Der Zylinder A, in welchem sich ein dicht schließender Kolben auf und nieder bewegen läßt; 2. die durch das Rohr C mit dem Zylinder verbundene, sorgfältig abgeschliffene Platte B (Teller); 3. die meist aus Glas hergestellte Glocke D, in welcher, nachdem sie luftdicht auf den Teller gesetzt ist, die Luft verdünnt werden soll; 4. der Hahn E, welcher dazu dient, die Verbindung zwischen dem Zylinder und der Glocke entweder herzustellen oder abzuschließen.

Der Hahn ist mit zwei Bohrungen versehen; wird der Kolben in die

Fig. 218.

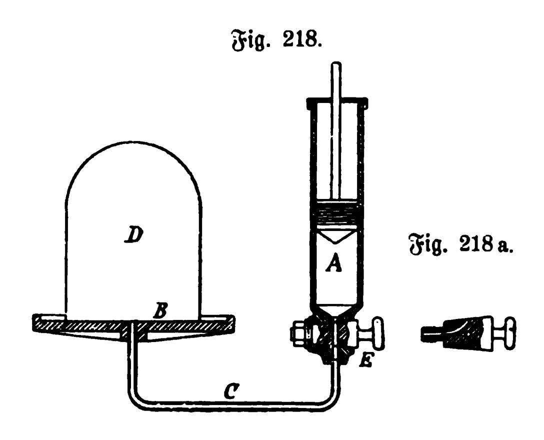


Fig. 218 a.

Höhe gezogen, so hat der Hahn die in Fig. 218 angegebene Stellung. Die in der Glocke D und im Rohre C enthaltene Luft dehnt sich dabei um den Raum des Zylinders aus und wird folglich verdünnt. Beim Niedergange des Kolbens wird der Hahn durch Drehung um 90° in die Stellung Fig. 218a gebracht, wodurch die Luft in C und D abgesperrt, A aber mit der äußeren Luft verbunden wird, so daß die im Zylinder befindliche Luft nach außen entweichen kann. Durch fortgesetztes Auf- und Niederbewegen des Kolbens bei entsprechender Hahnstellung wird die Luft immer mehr und mehr verdünnt.

Wird der Rauminhalt des Zylinders mit V, der der Glocke nebst dem Rohr mit V_1 bezeichnet, so ist die Verdünnung der Luft:

nach dem ersten Hube $= \left(1 + \frac{V}{V_1}\right)$

„ „ zweiten „ $= \left(1 + \frac{V}{V_1}\right)^2$

. . . .

allgemein „ „ n ten „ $= \left(1 + \frac{V}{V_1}\right)^n$

Ist z. B. $V_1 = 2V$, so würde nach dem dritten Hube die Verdünnung der Luft:

$$\left(1 + \frac{1}{2}\right)^3 = \frac{27}{8}$$

sein; d. h. das Gewicht von 1 cbm der verdünnten Luft würde nur $^8/_{27}$ von dem der gewöhnlichen atmosphärischen Luft betragen.

Soll die Luftpumpe zum Verdichten der Luft benutzt werden, so erhält der Hahn gerade die umgekehrte Stellung als beim Verdünnen der Luft. Die in Fig. 218 angegebene Hahnstellung würde also dem Niedergange des Kolbens entsprechen. An das Ende des Rohres C ist dann statt des Tellers B die entsprechend gestaltete Glocke D luftdicht aufzuschrauben.

Aufgabe 126. Es sollen die Abmessungen und die erforderliche Betriebskraft einer Feuerspritze berechnet werden, welche in der Sekunde 0,007 cbm Wasser auf eine Höhe H = 20 m zu bringen imstande ist. Dabei sind folgende Werte gegeben:

Hubhöhe der Mannschaft	$s =$	1,25 m
Geschwindigkeit des Druckbaumes	$C =$	1,4 „
Geschwindigkeit der Pumpenkolben	$c =$	0,28 „
Güteverhältnis der Pumpen	$\eta =$	0,75
Durchmesser des Schlauches	$d_1 =$	0,05 „
Länge des Schlauches	$l =$	20 „

Auflösung. Nach Gl. 292) S. 198 wird:

$$v = 4{,}95 \sqrt{20} = 22{,}14 \text{ m}$$

Folglich nach Gl. 293):

$$\frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0{,}007}{22{,}14} = 0{,}000316 \text{ qm} = 3{,}16 \text{ qcm}$$

oder Durchmesser des Mundstückes:

$$d = \infty\ 2 \text{ cm}$$

Die Übersetzung des Druckhebels wird nach Gl. 294):

$$m = \frac{C}{c} = \frac{1,4}{0,28} = 5$$

Also nach Gl. 295) Kolbenhub:

$$h = \frac{1,25}{5} = 0,25 \text{ m}$$

und nach Gl. 296):

$$\frac{D^2 \pi}{4} = \frac{3,14 \,.\, 22,14}{0,28} = 248 \text{ qcm}$$

oder Kolbendurchmesser:

$$D = \backsim 18 \text{ cm.}$$

Ohne Schlauch würde nach Gl. 297) sich ergeben:

$$P = \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1000 \,.\, 0,007 \,.\, {}^5/_4 \,.\, 20}{1,4} = \backsim 167 \text{ kg}$$

Die Geschwindigkeit v_1 des Wassers im Schlauche ergibt sich aus:

$$\frac{d_1^2 \pi}{4} v_1 = \frac{d^2 \pi}{4} v$$

zu:

$$v_1 = v \frac{d^2}{d_1^2} = 22,14 \,.\, \frac{4}{25} = 3,54 \text{ m}$$

Folglich wird nach Gl. 298):

$$h_1 = 0,04 \,.\, \frac{20}{0,05} \cdot \frac{3,54^2}{2 \,.\, 9,81} = 10,2 \text{ m}$$

und nach Gl. 299) die am Druckhebel auszuübende Kraft:

$$P = \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1000 \,.\, 0,007 \,({}^5/_4 \,.\, 20 + 10,2)}{1,4} = \backsim 235 \text{ kg}$$

Da man einen Mann mit 15 kg in Anschlag bringen kann, so erfordert die Pumpe zum Betriebe etwa 16 Mann. Der Druck im Windkessel ist nach Gl. 300):

$$p = \frac{{}^5/_4 \,.\, 20 + 10,2}{10} = \backsim 3,5 \text{ Atm.} = 3,5 \text{ kg/qcm}$$

Abschnitt VII.

Die Lehre von der Bewegung gasförmiger Körper (Aerodynamik).

§ 44.

Ausfluß der Luft.

Die in § 33 für die Ausflußgeschwindigkeit des Wassers gefundene Gl. 240) S. 170:

$$v = \sqrt{2gh}$$

kann auch zur Bestimmung der Ausflußgeschwindigkeit der Luft benutzt werden, wenn man darin die Wassersäule von der Höhe h ersetzt durch eine Luftsäule von demselben Gewichte.

Da sich die Gewichte von Wasser und atmosphärischer Luft verhalten wie 1000:1,293*), so wird die Luftsäule, welche einer Wassersäule von der Höhe h das Gleichgewicht hält, eine Höhe $= \frac{1000}{1,293}$ h haben. Danach ergibt sich für die Geschwindigkeit, mit welcher Luft von höherer Pressung aus der Öffnung eines Gefäßes in die freie Atmosphäre ausströmt:

$$v = \sqrt{2g \frac{1000}{1,293} h} = 27,8 \sqrt{2gh} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 301)$$

worin h die Höhe einer Wassersäule bedeutet, durch welche der Druckunterschied gemessen wird.

Bei Ableitung der Gl. 301) ist der Druckunterschied als unveränderlich angenommen; ebenso ist die Temperaturänderung, welche die Luft bei dem Durchgang durch die Öffnung erleidet, unberücksichtigt geblieben; beides ist indessen nur für ganz geringe Druckunterschiede zulässig, und nur für diesen Fall ergibt Gl. 301) brauchbare Ergebnisse.

Bezeichnet man den Querschnitt der Öffnung mit f, so ist, wenn der Ausfluß der Luft ohne Einschnürung erfolgen würde, die Ausflußmenge:

$$Q = fv \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 302)$$

In Wirklichkeit findet aber stets Einschnürung statt; um die wirkliche Ausflußmenge zu erhalten, hat man daher (wie beim Ausfluß des Wassers S. 173) den in Gl. 302) angegebenen Wert noch mit einem Ausflußkoeffizienten μ zu multiplizieren.

Bei vollkommener Einschnürung (bei Öffnungen in dünner Wand) ist:

$$\mu = 0,62$$

Bei Anwendung eines kurzen kegelförmigen Ansatzrohres mit gut abgerundeten Kanten (Fig. 200 S. 174) kann man setzen:

$$\mu = 0,9$$

Aufgabe 127. In einem größeren Gefäße sei Luft von 1,2 Atmosphären Spannung eingeschlossen und fließe durch eine Öffnung von 0,002 qm Querschnitt in die freie Atmosphäre. Es soll die Geschwindigkeit v und die in der Sekunde ausfließende Luftmenge Q berechnet werden.

Auflösung. Der Druckunterschied beträgt 1,2 — 1 = 0,2 Atmosphären; diesen entspricht eine Wassersäule von der Höhe:

$$h = 0,2 \,.\, 10,33 = 2,066 \text{ m}$$

Also nach Gl. 301):

$$v = 27,8 \sqrt{2 \,.\, 9,81 \,.\, 2,066} = 177 \text{ m}$$

Die theoretische Ausflußmenge ergibt sich nach Gl. 302) zu:

$$Q = 0,002 \,.\, 177 = 0,354 \text{ cbm}$$

Bei gut abgerundeter Düse ($\mu = 0,9$) ist dann die wirklich ausfließende Luftmenge:

$$Q = 0,9 \,.\, 0,354 = \backsim 0,32 \text{ cbm}$$

*) 1 cbm Luft wiegt 1,293 kg (vergl. S. 190).

§ 45.

Bewegung der Gase in Rohrleitungen.

Bewegt sich ein Gas mit einer gewissen Geschwindigkeit in einem Rohre, so entsteht (ebenso wie bei den tropfbar flüssigen Körpern) durch die an den Rohrwänden auftretende Reibung ein Widerstand. Um die zur Ueberwindung desselben erforderliche Druckhöhe zu bestimmen, kann Gl. 254) S. 178 benutzt werden, wenn darin die Wassersäule von der Höhe h_1 ersetzt wird durch eine Gassäule von demselben Gewichte. Wird mit γ das Gewicht von 1 cbm Gas bezeichnet, so ergibt sich die Höhe dieser Gassäule $= \frac{1000}{\gamma} h_1$.

Für atmosphärische Luft ist: $\gamma = 1{,}293$

„ Leuchtgas „ $\gamma = 0{,}52$ *)

Der Druckhöhenverlust in Meter Wassersäule beträgt daher nach Einsetzung dieser Werte in Gl. 254):

für atmosphärische Luft: $h_1 = 0{,}000081 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$ . . . . 303)

„ Leuchtgas: $h_1 = 0{,}0000125 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$ . . . . 304)

Soll Druck und Temperatur des betr. Gases berücksichtigt werden, so ist das Gewicht von 1 cbm nach Gl. 280) S. 190 einzusetzen mit:

$$\gamma = \frac{1}{V} = \frac{p}{RT}$$

Nach Gl. 254) ergibt sich dann der Druckverlust h_1 in m Wassersäule:

$$h_1 = 0{,}000024 \cdot \frac{p}{RT} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \ldots\ldots \quad 305)$$

oder wenn der absolute Drück p (anstatt in kg/qm) in Atm. (kg/qcm) eingesetzt wird:

$$h_1 = 0{,}24 \cdot \frac{p}{RT} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \ldots\ldots \quad 306)$$

Aufgabe 128. In einer Rohrleitung von 1000 m Länge und 15 cm Durchmesser bewegt sich Leuchtgas mit 3 m Geschwindigkeit. Wenn der Überdruck am Anfang der Leitung 0,13 m Wassersäule beträgt, wie groß ist derselbe am Ende der Leitung?

Auflösung. Der Verlust an Druckhöhe ist nach Gl. 304):

$$h_1 = 0{,}0000125 \frac{1000}{0{,}15} \cdot \frac{3^2}{2 \,.\, 9{,}81} = 0{,}038 \text{ m}$$

Der Druck am Ende der Leitung beträgt daher:

$$0{,}13 - 0{,}038 = 0{,}092 \text{ m Wassersäule.}$$

*) Vergl. Anhang Tabelle II (spezifische Gewichte).

Aufgabe 129. Der Druck in einer wagerechten Luftleitung von 25 cm Durchmesser und 1 km Länge soll bestimmt werden, wenn gegeben ist:

Überdruck = 5 Atm. = 5 kg/qcm; also p = 6 Atm.

mittlere Temperatur = 20°; also T = 273 + 20 = 293°.

Luftgeschwindigkeit v = 6 m.

Auflösung. Für Luft ist nach Gl. 282) S. 190:

$$R = 29{,}27$$

Also Druckverlust nach Gl. 306):

$$h_1 = \frac{0{,}24\,.\,6}{29{,}27\,.\,293} \cdot \frac{1000}{0{,}25} \cdot \frac{6^2}{2\,.\,9{,}81} = 1{,}23 \text{ m Wassersäule}$$

oder in Atm. ausgedrückt:

$$h_1 = 0{,}123 = \sim 0{,}1 \text{ Atm.}$$

Am Ende der Leitung werden dann noch: ∾ 4,9 Atm. Überdruck vorhanden sein.

§ 46.

Widerstand der Flüssigkeiten (Wasser und Luft) gegen bewegte feste Körper.

Wird ein fester Körper in einer ruhenden Flüssigkeit (wobei als Vertreter der tropfbaren Flüssigkeiten Wasser, als der der gasförmigen Flüssigkeiten Luft angesehen werden kann) bewegt, so tritt der Bewegung ein Widerstand entgegen. Dieser entsteht dadurch, daß der Körper die Wasser- oder Luftteilchen aus dem Raume verdrängen muß, in welchen er selbst einzudringen strebt, wodurch die Geschwindigkeit seiner Bewegung verringert wird.

Der Widerstand ist bei mäßigen Geschwindigkeiten erfahrungsgemäß verhältnisgleich dem Quadrate der Geschwindigkeit des bewegten Körpers; er ist außerdem um so größer, je dichter die Flüssigkeit (das Mittel oder Medium) ist, d. h. je größer das Gewicht der Raumeinheit derselben ist; ferner um so größer, je größer die der Einwirkung des Mittels ausgesetzte Fläche des Körpers ist. Diese Fläche ist gleich zu setzen der Projektion des Körpers auf eine rechtwinklig zur Bewegungsrichtung stehende Ebene. Dabei ist noch die Gestalt des Körpers von wesentlichem Einfluß, indem z. B. ein vorn zugespitzter oder zugeschärfter Körper (z. B. ein Schiff) sich leichter in der Flüssigkeit fortbewegt, als wenn er vorn flach oder hohl wäre.

Für die Größe des Widerstandes ergibt sich der schon in § 37 S. 184 (Gl. 271) abgeleitete Ausdruck:

$$W = k\gamma F \frac{v^2}{2g} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 307)$$

in welchem γ das Gewicht der Flüssigkeit für die Raumeinheit, F den Flächeninhalt jener Projektion des Körpers, v die Geschwindigkeit und k einen von der Form des Körpers abhängigen Erfahrungskoeffizienten bezeichnet.

Werte für k, welche sich auf den Widerstand des Wassers gegen bewegte Körper beziehen, sind schon auf S. 184 angegeben.

Für Berechnung des Luftwiderstandes gegen bewegte Körper gilt ebenfalls Gl. 307), in welcher k nach Versuchen von Frank*) für Bewegung der Körper in ihrer Längsrichtung z. B. folgendermaßen im Mittel gewählt werden kann:

Für Zylinder:

mit rechtwinklig zur Achse stehenden Endflächen:	$k = 1{,}106$
„ vorgesetzten Kegeln:	$k = 0{,}720$
„ tangential anschließenden Halbkugeln:	$k = 0{,}565$
„ „ „ Ellipsoiden:	$k = 0{,}462$

Für Körper mit quadratischem Querschnitt und:

mit rechtwinklig zur Achse stehenden Endflächen:	$k = 1{,}164$
„ vorgesetzten Keilflächen:	$k = 0{,}810$
„ „ Pyramiden:	$k = 0{,}720$

Bei Bewegung des Körpers einem Luftstrome entgegen, welcher selbst die Geschwindigkeit v_1 besitzt, geht Gl. 307) über in:

$$W = k\gamma F \frac{(v + v_1)^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 308)$$

Redtenbacher gibt bei Eisenbahnzügen den Luftwiderstand angenähert an zu:

$$W = 0{,}0704 \left(F + \frac{1}{4} fn\right) v^2 \quad \ldots\ldots \quad 309)$$

worin F die Vorderfläche der Lokomotive, f die Vorderfläche jedes der angehängten Wagen, n die Anzahl derselben und v die Fahrgeschwindigkeit bedeutet.

Über Größe des Luftdruckes (Winddruck) auf nicht bewegte Körper (z. B. Dächer) siehe: Lauenstein „Graphische Statik," 9. Aufl. § 16 S. 134.

Aufgabe 130. Gesucht: Luftwiderstand für einen Körper von 4 qm Vorderfläche, der sich mit $v = 20$ m bewegt.

Auflösung. Nach Gl. 307) ergibt sich für $\gamma = \sim 1{,}3$ kg und $k = \sim 1{,}2$:

$$W = 1{,}2 \,.\, 1{,}3 \,.\, 4 \,.\, \frac{20^2}{2 \,.\, 9{,}81} = \sim 127 \text{ kg}$$

Besitzt die Luft selbst eine Geschwindigkeit $v_1 = 10$ m (Mäßiger Wind nach der internationalen Skala für Windstärken), so würde sich nach Gl. 308) ergeben:

$$W = 1{,}2 \,.\, 1{,}3 \,.\, 4 \,.\, \frac{30^2}{2 \,.\, 9{,}81} = \sim 286 \text{ kg}$$

Aufgabe 131. Wie groß ist der Luftwiderstand bei einem 6 Wagen führenden Eisenbahnzuge, welcher sich mit einer Geschwindigkeit von 20 m in der Sekunde bewegt?

Auflösung. Nimmt man F zu 7 qm, f zu 4 qm an, so ist nach Gl. 309):

$$W = 0{,}0704\,(7 + {}^1/_4 \,.\, 4 \,.\, 6)\, 20^2 = 366 \text{ kg}$$

*) Zeitschrift d. V. d. Ing. 1906 S. 593.

Anhang.

Tabelle I.

Reibungskoeffizienten.

a) Koeffizienten für gleitende Reibung.

Reibende Körper	Zustand der Oberflächen	Reibungskoeffizient f der Ruhe	Reibungskoeffizient f der Bewegung
Gußeisen			
auf Gußeisen oder Bronze	wenig fettig	0,16	0,15
Schweißeisen			
auf Schweißeisen	trocken	—	0,44
	wenig fettig	0,13	—
auf Gußeisen oder Bronze	trocken	0,19	0,18
Stahl			
auf Stahl	trocken	0,15	—
Bronze			
auf Bronze	trocken	—	0,2
auf Gußeisen	trocken	—	0,21
auf Schweißeisen	wenig fettig	—	0,16
Eiche			
auf Eiche: Fasern parallel der Bewegung	trocken	0,62	0,48
	mit Seife geschmiert	0,44	0,16
auf Eiche: Fasern senkrecht zur Bewegung	trocken	0,54	0,34
	mit Wasser	0,71	0,25
Lederriemen			
auf Eiche	wenig fettig	0,47	—
	trocken	—	0,27
auf Gußeisen	wenig fettig	0,28	—
Leder als Kolbenliderung: hartes Leder	geschmiert	0,12	0,1
Leder als Kolbenliderung: weiches Leder	geschmiert	0,07	0,03

b) Koeffizienten für Zapfenreibung.

Reibende Körper	Reibungskoeffizient f der Bewegung Schmierung	
	auf gewöhnl. Art	ununterbrochen
Gußeisen		
auf Gußeisen	0,075	0,054
auf Bronze	0,075	0,05
auf Pockholz	0,1	0,09 (0,28 mit Wasser).
Schweißeisen*)		
auf Gußeisen oder Bronze	0,07	0,03 bis 0,05
am Pockholz	0,11	—

*) Kirchweger fand bei gut gelagerten Eisenbahnwagenachsen aus Flußstahl und bei vorzüglicher Schmierung f = 0,01.

Anmerkung. Der Reibungskoeffizient der Ruhe ist für Zapfenreibung nahezu 10mal so groß als der der Bewegung.

Tabelle II.

Spezifische Gewichte.

a) Feste Körper.

Bezogen auf Wasser bei 4° C. und 760 mm Quecksilberdruck.

Stoff	Gewicht
Aluminium	2,5 — 2,7
Anthracit	1,4 — 1,7
Antimon	6,6 — 6,7
Asbest	2,1 — 2,8
Asphalt, rein	1,1 — 1,5
„ mit Schotter gestampft	1,8 — 2,0
Basalt	2,7 — 3,2
Beton	1,8 — 2,45
Blei	11,3 —11,4
Bronze	7,4 — 8,9
Eis	0,88— 0,92
Eisen, chemisch rein	7,88
Eisenerz	3,4 — 5,0
Elfenbein	1,8 — 1,9
Erde	1,4 — 2,0
Flußeisen	7,85
Flußstahl	7,86
Gips, gegossen	0,97— 1,1
Glas, Fenster-	2,4 — 2,6
„ Flint-	3,2 — 3,9
Glockenmetall	8,8
Gold	18,6 — 19,3

Stoff	grün	lufttrocken
Granit	2,5—3,0	
Graphit	1,9—2,3	
Gußeisen	7,25	
Holzarten:	grün	lufttrocken
Ahorn	0,9	0,7
Birke	0,9	0,7
Buche	0,98	0,72
Buchsbaum	1,00	0,97
Eiche	1,00	0,6–0,85
Esche	0,85	0,65
Fichte	0,9	0,43
Kiefer	0,9	0,6
Kork	—	0,24
Pappel	0,86	0,4–0,5
Pockholz	—	1,33
Tanne	0,89	0,6
Holzkohle von Nadelholz	0,28—0,44	
„ „ Eichenholz	0,57	
Kalk, gebrannt	2,3 —3,1	
Kalkmörtel	1,6 —1,8	
Kalkstein	2,5 —2,8	

Kautschuk	0,92—0,96	Sandstein	1,9 — 2,7
Kies	1,8 —2,0	Schiefer	2,6 — 2,7
Kieselstein	2,3 —2,7	Schnee, lose	0,125
Koks	0,3 —0,5	Schwefel	1,96— 2,05
Kupfer	8,6 —9	Schweißeisen	7,8
Lehm, trocken	1,52	Schweißstahl	7,86
„ frisch gegraben	1,7 —2,8	Schwerspat	4,47
Marmor	2,5 —2,8	Silber	10,1 —10,6
Mauerwerk:		Stahl	7,8 — 8,0
Bruchstein	2,4 —2,46	Steinkohlen	1,2 — 1,5
Sandstein	2,05—2,12	Ton	1,8 — 2,6
Ziegel	1,47—1,7	Wachs	0,95 —0,98
Messing	8,4 —8,7	Zement	2,7 — 3,1
Pech	1,07—1,1	Ziegelstein	1,4 — 2,2
Platin	21,15—21,45	Zink	6,8 — 7,2
Porzellan	2,3 —2,5	Zinn	7,2 — 7,5
Quarz	2,5 —2,8	Zinnober	8,1
Sand, trocken	1,4 —1,6	Zucker	1,6
Sand, feucht	1,9 —2,0		

b) Flüssige Körper.

Bezogen auf Wasser bei 4° C. und 760 mm Quecksilberdruck.

Alkohol (wasserfrei)	0,79	Quecksilber	13,59
Bier	1,02—1,04	Salpetersäure	1,50
Glyzerin (wasserfrei)	1,26	Salzsäure	1,19
Kochsalzlauge, gesättigt	1,21	Schwefeläther	0,73
Milch	1,03	Schwefelsäure (englische)	1,84
Öle: Leinöl (gekocht)	0,94	„ (nordhäuser)	1,90
Olivenöl	0,92	Seewasser	1,02—1,03
Rüböl	0,91—0,92	Teer	1,20
Terpentinöl	0,87	Wasser (destilliert)	1,00
Petroleum	0,79—0,82		

c) Gasförmige Körper.

Bezogen auf atmosphärische Luft bei 0° und 760 mm Quecksilberdruck.

		1 cbm wiegt:			1 cbm wiegt:
Atmosphärische Luft	1	1,293 kg	Sauerstoff	1,1056	1,430 kg
Kohlenoxyd	0,9673	1,251 „	Stickstoff	0,9714	1,256 „
Kohlensäure	1,5291	1,977 „	Wasserstoff	0,0693	0,0896 „
Leuchtgas	0,4	0,52 „	Wasserdampf bei 100°	0,4656	0,602 „

Tabelle III a.

Fallhöhen für die Endgeschwindigkeiten von 0 bis 30 m

v = runde Zahl; $h = \frac{v^2}{2g}$

v =	h =	v =	h =	v =	h =	v =	h =
0,00	0,00000	1,45	0,10716	3,3	0,5550	11,0	6,1672
0,05	0,00013	1,50	0,11468	3,4	0,5892	11,5	6,7406
0,10	0,00051	1,55	0,12245	3,5	0,6244	12,0	7,3394
0,15	0,00115	1,60	0,13048	3,6	0,6606	12,5	7,9638
0,20	0,00204	1,65	0,13876	3,7	0,6978	13,0	8,6137
0,25	0,00319	1,70	0,14730	3,8	0,7360	13,5	9,2890
0,30	0,00459	1,75	0,15609	3,9	0,7752	14,0	9,9898
0,35	0,00624	1,80	0,16514	4,0	0,8155	14,5	10,7161
0,40	0,00816	1,85	0,17444	4,1	0,8568	15,0	11,4679
0,45	0,01032	1,90	0,18400	4,2	0,8991	15,5	12,2452
0,50	0,01274	1,95	0,19381	4,3	0,9424	16,0	13,0479
0,55	0,01542	2,00	0,20387	4,4	0,9868	16,5	13,8761
0,60	0,01835	2,05	0,21419	4,5	1,0321	17,0	14,7299
0,65	0,02153	2,10	0,22477	4,6	1,0785	17,5	15,6091
0,70	0,02498	2,15	0,23560	4,7	1,1259	18,0	16,5138
0,75	0,02867	2,20	0,24669	4,8	1,1743	18,5	17,4439
0,80	0,03262	2,25	0,25803	4,9	1,2238	19,0	18,3996
0,85	0,03683	2,30	0,26962	5,0	1,2742	19,5	19,3807
0,90	0,04128	2,35	0,28147	5,5	1,5418	20	20,3874
0,95	0,04600	2,40	0,29358	6,0	1,8349	21	22,4771
1,00	0,05097	2,45	0,30594	6,5	2,1534	22	24,6687
1,05	0,05619	2,50	0,31855	7,0	2,4975	23	26,9623
1,10	0,06167	2,6	0,34455	7,5	2,8670	24	29,3578
1,15	0,06741	2,7	0,37156	8,0	3,2620	25	31,8552
1,20	0,07339	2,8	0,39959	8,5	3,6825	26	34,4546
1,25	0,07964	2,9	0,42864	9,0	4,1284	27	37,1560
1,30	0,08614	3,0	0,45872	9,5	4,5999	28	39,9592
1,35	0,09289	3,1	0,48981	10,0	5,0968	29	42,8644
1,40	0,09990	3,2	0,52192	10,5	5,6193	30	45,8716

Tabelle IIIb.

Endgeschwindigkeiten für die Fallhöhen von 0 bis 38 m

h = runde Zahl; $v = \sqrt{2gh}$

h =	v =	h =	v =	h =	v =	h =	v =
0,00	0,0000	2,0	6,2642	5,0	9,9045	12,5	15,660
0,05	0,9905	2,1	6,4189	5,2	10,101	13,0	15,971
0,10	1,4007	2,2	6,5699	5,4	10,293	13,5	16,275
0,15	1,7155	2,3	6,7176	5,6	10,482	14,0	16,573
0,20	1,9809	2,4	6,8621	5,8	10,668	14,5	16,867
0,25	2,2147	2,5	7,0036	6,0	10,850	15,0	17,155
0,30	2,4261	2,6	7,1423	6,2	11,029	15,5	17,439
0,35	2,6205	2,7	7,2783	6,4	11,206	16,0	17,718
0,40	2,8014	2,8	7,4119	6,6	11,380	16,5	17,990
0,45	2,9714	2,9	7,5431	6,8	11,551	17,0	18,263
0,50	3,1321	3,0	7,6720	7,0	11,719	17,5	18,530
0,55	3,2850	3,1	7,7988	7,2	11,886	18,0	18,793
0,60	3,4311	3,2	7,9236	7,4	12,049	18,5	19,052
0,65	3,5711	3,3	8,0465	7,6	12,211	19,0	19,308
0,70	3,7059	3,4	8,1675	7,8	12,371	19,5	19,560
0,75	3,8360	3,5	8,2867	8,0	12,528	20	19,809
0,80	3,9618	3,6	8,4043	8,2	12,684	21	20,298
0,85	4,0838	3,7	8,5202	8,4	12,838	22	20,776
0,90	4,2021	3,8	8,6346	8,6	12,990	23	21,243
0,95	4,3173	3,9	8,7475	8,8	13,140	24	21,670
1,0	4,4295	4,0	8,8589	9,0	13,288	25	22,147
1,1	4,6456	4,1	8,9690	9,2	13,435	26	22 586
1,2	4,8522	4,2	9,0777	9,4	13,580	27	23,016
1,3	5,0504	4,3	9,1851	9,6	13,724	28	23,438
1,4	5,2410	4,4	9,2913	9,8	13,866	29	23,854
1,5	5,4249	4,5	9,3963	10,0	14,007	30	24,261
1,6	5,6028	4,6	9,5001	10,5	14,353	32	25,057
1,7	5,7753	4,7	9,6028	11,0	14,691	34	25,828
1,8	5,9427	4,8	9,7044	11,5	15,021	36	26,577
1,9	6,1056	4,9	9,8050	12,0	15,344	38	27,305

Tabelle IV. Trigonometrische Zahlen.

Grad	Sinus							Grad
	0'	10'	20'	30'	40'	50'	60'	
0	0 00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01454	0,01745	89
1	0,01745	0,02036	0,02327	0,02618	0,02908	0,03199	0,03490	88
2	0,03490	0,03781	0,04071	0,04362	0,04653	0,04943	0,05234	87
3	0,05234	0,05524	0,05814	0,06105	0,06395	0,06685	0,06976	86
4	0,06976	0,07266	0,07556	0,07846	0,08136	0,08426	0,08716	85
5	0,08716	0,09005	0,09295	0,09585	0,09874	0,10164	0,10453	84
6	0,10453	0,10742	0,11031	0,11320	0,11609	0,11898	0,12187	83
7	0,12187	0,12476	0,12764	0,13053	0,13341	0,13629	0,13917	82
8	0,13917	0,14205	0,14493	0,14781	0,15069	0,15356	0,15643	81
9	0,15643	0,15931	0,16218	0,16505	0,16792	0,17078	0,17365	**80**
10	0,17365	0,17651	0,17937	0,18224	0,18509	0,18795	0,19081	79
11	0,19081	0,19366	0,19625	0,19937	0,20222	0,20507	0,20791	78
12	0,20791	0,21076	0,21360	0,21644	0,21928	0,22212	0,22495	77
13	0,22495	0,22778	0,23062	0,23345	0,23627	0,23910	0,24192	76
14	0,24192	0,24474	0,24756	0,25038	0,25320	0,25601	0,25882	75
15	0,25882	0,26163	0,26443	0,26724	0,27004	0,27284	0,27564	74
16	0,27564	0,27843	0,28123	0,28402	0,28680	0,28959	0,29237	73
17	0,29237	0,29515	0 29793	0,30071	0,30348	0,30625	0,30902	72
18	0,30902	0,31178	0,31454	0,31730	0,32006	0,32282	0,32557	71
19	0,32557	0,32832	0,33106	0,33381	0,33655	0,33929	0,34202	**70**
20	0,34202	0,34475	0,34748	0,35021	0,35293	0,35565	0,35837	69
21	0,35837	0,36108	0,36379	0,36650	0,36921	0,37191	0,37461	68
22	0,37461	0,37730	0,37999	0,38268	0,38537	0,38805	0,39073	67
23	0,39073	0,39341	0,39608	0,39875	0,40141	0,40408	0,40674	66
24	0,40674	0,40939	0,41204	0,41469	0,41734	0,41998	0,42262	65
25	0,42262	0,42525	0,42788	0,43051	0,43313	0,43575	0,43837	64
26	0,43837	0,44098	0,44359	0,44620	0,44880	0,45140	0,45399	63
27	0,45399	0,45658	0,45917	0,46175	0,46433	0,46690	0,46947	62
28	0,46947	0,47204	0,47460	0,47716	0,47971	0,48226	0,48481	61
29	0,48481	0,48735	0,48989	0,49242	0,49495	0,49748	0,50000	**60**
30	0,50000	0,50252	0,50503	0,50754	0,51004	0,51254	0,51504	59
31	0,51504	0,51753	0,52002	0,52250	0,52498	0,52745	0,52992	58
32	0,52992	0,53238	0,53484	0,53730	0,53975	0,54220	0,54464	57
33	0,54464	0,54708	0,54951	0,55194	0,55436	0,55678	0,55919	56
34	0,55919	0,56160	0,56401	0,56641	0,56880	0,57119	0,57358	55
35	0,57358	0,57596	0,57833	0,58070	0,58307	0,58543	0,58779	54
36	0,58779	0,59014	0,59248	0,59482	0,59716	0,59949	0,60182	53
37	0,60182	0,60414	0,60645	0,60876	0,61107	0,61337	0,61566	52
38	0,61566	0,61795	0,62024	0,62251	0,62479	0,62706	0,62932	51
39	0,62932	0,63158	0,63383	0,63608	0,63832	0,64056	0,64279	**50**
40	0,64279	0,64501	0,64723	0,64945	0,65166	0,65386	0 65606	49
41	0,65606	0,65825	0,66044	0,66262	0,66480	0,66697	0,66913	48
42	0,66913	0,67129	0,67344	0,67559	0,67773	0,67987	0,68200	47
43	0,68200	0,68412	0,68624	0,68835	0,69046	0,69256	0,69466	46
44	0,69466	0,69675	0,69883	0,70091	0,70298	0,70505	0,70711	45
	60'	50'	40'	30'	20'	10'	0'	

Cosinus

Grad	Cosinus							Grad
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	1,00000	1,00000	0,99998	0,99996	0,99993	0,99989	0,99985	89
1	0,99985	0,99979	0,99973	0,99966	0,99958	0,99949	0,99939	88
2	0,99939	0,99929	0,99917	0,99905	0,99892	0,99878	0,99863	87
3	0,99863	0,99847	0,99831	0,99813	0,99795	0,99776	0,99756	86
4	0,99756	0,99736	0,99714	0,99692	0,99668	0,99644	0,99619	85
5	0,99619	0,99594	0,99567	0,99540	0,99511	0,99482	0,99452	84
6	0,99452	0,99421	0,99390	0,99357	0,99324	0,99290	0,99255	83
7	0,99255	0,99219	0,99182	0,99144	0,99106	0,99067	0,99027	82
8	0,99027	0,98986	0,98944	0,98902	0,98858	0,98814	0,98769	81
9	0,98769	0,98723	0,98676	0,98629	0,98580	0,98531	0,98481	**80**
10	0,98481	0,98430	0,98378	0,98325	0,98272	0,98218	0,98163	79
11	0,98163	0,98107	0,98050	0,97992	0,97934	0,97875	0,97815	78
12	0,97815	0,97754	0,97692	0,97630	0,97566	0,97502	0,97437	77
13	0,97437	0,97371	0,97304	0,97237	0,97169	0,97100	0,97030	76
14	0,97030	0,96959	0,96887	0,96815	0,96742	0,96667	0,96593	75
15	0,96593	0,96517	0,96440	0,96363	0,96285	0,96206	0,96126	74
16	0,96126	0,96046	0,95964	0,95882	0,95799	0,95715	0,95630	73
17	0,95630	0,95545	0,95459	0,95372	0,95284	0,95195	0,95106	72
18	0,95106	0,95015	0,94924	0,94832	0,94740	0,94646	0,94552	71
19	0,94552	0,94457	0,94361	0,94264	0,94167	0,94068	0,93969	**70**
20	0,93969	0,93869	0,93769	0,93667	0,93565	0,93462	0,93358	69
21	0,93358	0,93253	0,93148	0,93042	0,92935	0,92827	0,92718	68
22	0,92718	0,92609	0,92499	0,92388	0,92276	0,92164	0,92050	67
23	0,92050	0,91936	0,91822	0,91706	0,91590	0,91472	0,91355	66
24	0,91355	0 91236	0,91116	0,90996	0,90875	0,90753	0,90631	65
25	0,90631	0,90507	0,90383	0,90259	0 90133	0,90007	0,89879	64
26	0,89879	0,89752	0,89623	0,89493	0,89363	0,89232	0,89101	63
27	0,89101	0,88968	0,88835	0,88701	0,88566	0,88431	0,88295	62
28	0,88295	0,88158	0,88020	0,87882	0,87743	0,87603	0,87462	61
29	0,87462	0,87321	0,87178	0,87036	0,86892	0,86748	0,86603	**60**
30	0,86603	0,86457	0,86310	0,86163	0,86015	0,85866	0,85717	59
31	0,85717	0,85567	0,85416	0,85264	0,85112	0,84959	0,84805	58
32	0,84805	0,84650	0,84495	0,84339	0,84182	0,84025	0,83867	57
33	0,83867	0,83708	0,83549	0,83389	0,83228	0,83066	0,82904	56
34	0,82904	0,82741	0,82577	0,82413	0,82248	0,82082	0,81915	55
35	0,81915	0,81748	0,81580	0,81412	0,81242	0,81072	0,80902	54
36	0,80902	0,80730	0,80558	0,80386	0,80212	0,80038	0,79864	53
37	0,79864	0,79688	0,79512	0,79335	0,79158	0,78980	0,78801	52
38	0,78801	0,78622	0,78442	0,78261	0 78079	0,77897	0,77715	51
39	0,77715	0,77531	0,77347	0,77162	0,76977	0,76791	0,76604	**50**
40	0,76604	0,76417	0,76229	0,76041	0,75851	0,75661	0,75471	49
41	0,75471	0,75280	0,75088	0,74896	0,74703	0,74509	0,74314	48
42	0,74314	0,74120	0,73924	0,73728	0,73531	0,73333	0,73135	47
43	0,73135	0,72937	0,72737	0,72537	0,72337	0,72136	0,71934	46
44	0,71934	0,71732	0,71529	0,71325	0,71121	0,70916	0,70711	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	
	Sinus							

Grad	Tangens 0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	Grad
0	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01455	0,01746	89
1	0,01746	0,02036	0,02328	0,02619	0,02910	0,03201	0,03492	88
2	0 03492	0,03783	0,04075	0,04366	0,04658	0,04949	0,05241	87
3	0,05241	0,05533	0,05824	0,06116	0,06408	0,06700	0,06993	86
4	0,06993	0,07285	0,07578	0,07870	0 08163	0,08456	0,08749	85
5	0,08749	0,09042	0,09335	0,09629	0,09923	0,10216	0,10510	84
6	0,10510	0,10805	0,11099	0,11394	0,11688	0,11983	0,12278	83
7	0,12278	0.12574	0,12869	0,13165	0,13461	0,13758	0,14054	82
8	0,14054	0,14351	0,14648	0,14945	0,15243	0,15540	0,15838	81
9	0,15838	0,16137	0,16435	0,16734	0,17033	0,17333	0,17633	**80**
10	0,17633	0,17933	0,18233	0,18534	0,18835	0,19136	0,19438	79
11	0,19438	0,19740	0,20042	0,20345	0,20648	0 20952	0,21256	78
12	0,21256	0,21560	0 21864	0,22169	0,22475	0,22781	0,23087	77
13	0,23087	0,23393	0,23700	0,24008	0,24316	0,24624	0,24933	76
14	0,24933	0,25242	0,25552	0,25862	0,26172	0,26483	0,26795	75
15	0 26795	0,27107	0,27419	0,27732	0,28046	0,28360	0,28675	74
16	0,28675	0,28990	0,29305	0,29621	0,29938	0,30255	0,30573	73
17	0,30573	0,30891	0,31210	0,31530	0,31850	0,32171	0,32492	72
18	0,32492	0,32814	0,33136	0,33460	0,33783	0,34108	0,34433	71
19	0,34433	0,34758	0,35085	0,35412	0,35740	0,36068	0,36397	**70**
20	0,36397	0,36727	0,37057	0,37388	0,37720	0,38053	0,38386	69
21	0,38386	0,38721	0,39055	0,39391	0,39727	0,40065	0,40403	68
22	0,40403	0,40741	0,41081	0,41421	0,41763	0,42105	0,42447	67
23	0,42447	0,42791	0,43136	0,43481	0,43828	0,44175	0,44523	66
24	0,44523	0,44872	0,45222	0,45573	0,45924	0,46277	0,46631	65
25	0,46631	0,46985	0,47341	0,47698	0,48055	0,48414	0,48773	64
26	0,48773	0,49134	0,49495	0,49858	0.50222	0,50587	0,50953	63
27	0,50953	0 51319	0,51688	0,52057	0,52427	0,52798	0,53171	62
28	0,53171	0,53545	0.53920	0,54296	0,54673	0,55051	0,55431	61
29	0,55431	0,55812	0,56194	0,56577	0,56962	0,57348	0,57735	**60**
30	0,57735	0,58124	0,58513	0.58905	0,59297	0,59691	0,60086	59
31	0,60086	0,60483	0,60881	0,61280	0,61681	0,62083	0,62487	58
32	0,62487	0,62892	0,63299	0,63707	0,64117	0,64528	0,64941	57
33	0,64941	0,65355	0,65771	0,66189	0,66608	0,67028	0,67451	56
34	0,67451	0,67875	0,68301	0,68728	0,69157	0,69588	0,70021	55
35	0,70021	0,70455	0.70891	0,71329	0,71769	0,72211	0,72654	54
36	0,72654	0,73100	0,73547	0,73996	0,74447	0,74900	0,75355	53
37	0,75355	0,75812	0,76272	0,76733	0,77196	0,77661	0,78129	52
38	0,78129	0,78598	0,79070	0,79544	0 80020	0,80498	0,80978	51
39	0,80978	0,81461	0,81946	0,82434	0,82923	0,83415	0,83910	**50**
40	0,83910	0,84407	0,84906	0,85408	0,85912	0,86419	0,86929	49
41	0,86929	0,87441	0,87955	0,88473	0,88992	0,89515	0,90040	48
42	0,90040	0,90569	0,91099	0,91633	0 92170	0,92709	0,93252	47
43	0,93252	0,93797	0,94345	0,94896	0,95451	0,96008	0,96569	46
44	0,96569	0,97133	0,97700	0,98270	0,98843	0,99420	1,00000	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	

Cotangens

Grad	Cotangens							Grad
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	∞	343,77371	171,88540	114,58865	85,93979	68,75009	57,28996	89
1	57,28996	49,10388	42,96408	38,18846	34,36777	31,24158	28,63625	88
2	28,63625	26,43160	24,54176	22,90377	21,47040	20,20555	19,08114	87
3	19,08114	18,07498	17,16934	16,34986	15,60478	14,92442	14,30067	86
4	14,30067	13,72674	13,19688	12,70621	12,25051	11,82617	11,43005	85
5	11,43005	11,05943	10,71191	10,38540	10,07803	9,78817	9,51436	84
6	9,51436	9,25530	9,00983	8,77689	8,55555	8,34496	8,14435	83
7	8,14435	7,95302	7,77035	7,59575	7,42871	7,26873	7,11537	82
8	7,11537	6,96823	6,82694	6,69116	6,56055	6,43484	6,31375	81
9	6,31375	6,19703	6,08444	5,97576	5,87080	5,76937	5,67128	80
10	5,67128	5,57638	5,48451	5,39552	5,30928	5,22566	5,14455	79
11	5,14455	5,06584	4,98940	4,91516	4,84300	4,77286	4,70463	78
12	4,70463	4,63825	4,57363	4,51071	4,44942	4,38969	4,33148	77
13	4,33148	4,27471	4,21933	4,16530	4,11256	4,06107	4,01078	76
14	4,01078	3,96165	3,91364	3,86671	3,82083	3,77595	3,73205	75
15	3,73205	3,68909	3,64705	3,60588	3,56557	3,52609	3,48741	74
16	3,48741	3,44951	3,41236	3,37594	3,34023	3,30521	3,27085	73
17	3,27085	3,23714	3 20406	3,17159	3,13972	3,10842	3,07768	72
18	3,07768	3 04749	3,01783	2,98869	2,96004	2,93189	2,90421	71
19	2,90421	2,87700	2,85023	2,82391	2,79802	2,77254	2,74748	70
20	2,74748	2,72281	2,69853	2,67462	2,65109	2,62791	2,60509	69
21	2,60509	2,58261	2,56046	2,53865	2,51715	2,49597	2,47509	68
22	2,47509	2,45451	2,43422	2,41421	2,39449	2,37504	2,35585	67
23	2,35585	2,33693	2,31826	2,29984	2,28167	2,26374	2,24604	66
24	2,24604	2,22857	2,21132	2,19430	2,17749	2,16090	2,14451	65
25	2,14451	2,12832	2,11233	2,09654	2,08094	2,06553	2,05030	64
26	2,05030	2,03526	2,02039	2,00569	1,99116	1,97680	1,96261	63
27	1,96261	1,94858	1,93470	1,92098	1,90741	1,89400	1,88073	62
28	1,88073	1,86760	1,85462	1,84177	1,82906	1,81649	1,80405	61
29	1,80405	1,79174	1,77955	1,76749	1,75556	1,74375	1,73205	60
30	1,73205	1,72047	1,70901	1,69766	1,68643	1,67530	1,66428	59
31	1,66428	1,65337	1,64256	1,63185	1,62125	1,61074	1,60033	58
32	1,60033	1,59002	1,57981	1,56969	1,55966	1,54972	1,53987	57
33	1,53987	1,53010	1,52043	1,51084	1,50133	1,49190	1,48256	56
34	1,48256	1,47330	1,46411	1,45501	1,44598	1,43703	1,42815	55
35	1,42815	1,41934	1,41061	1,40195	1,39336	1,38484	1,37638	54
36	1,37638	1,36800	1,35968	1,35142	1,34323	1,33511	1,32704	53
37	1,32704	1,31904	1,31110	1,30323	1,29541	1,28764	1,27994	52
38	1,27994	1,27230	1,26471	1,25717	1,24969	1,24227	1,23490	51
39	1,23490	1,22758	1,22031	1,21310	1,20593	1,19882	1,19175	50
40	1,19175	1,18474	1,17777	1,17085	1,16398	1,15715	1,15037	49
41	1,15037	1,14363	1,13694	1,13029	1,12369	1,11713	1,11061	48
42	1,11061	1,10414	1,09770	1,09131	1,08496	1,07864	1,07237	47
43	1,0723[illegible]	1,06613	1,05994	1,05378	1,04766	1,04158	1,03553	46
44	1,03553	1,02952	1,02355	1,01761	1,01170	1,00583	1,00000	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	

Tangens.

Tabelle V.

Logarithmen der Zahlen 1 bis 1200.

Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.
1	00000	04139	07918	11394	14613	17609	20412	23045	25527	27875	2228
2	30103	32222	34242	36173	38021	39794	41497	43136	44716	46240	1472
3	47712	49136	50515	51851	53148	54407	55630	56820	57978	59106	1100
4	60206	61278	62325	63347	64345	65321	66276	67210	68124	69020	877
5	69897	70757	71600	72428	73239	74036	74819	75587	76343	77085	730
6	77815	78533	79239	79934	80618	81291	81954	82607	83251	83885	625
7	84510	85126	85733	86332	86923	87506	88081	88649	80209	89763	546
8	90309	90849	91381	91908	92428	92942	93450	93952	94448	94939	485
9	95424	95904	96379	96848	97313	97772	98227	98677	99123	99564	436
10	00000	00432	00860	01284	01703	02119	02531	02938	03342	03743	396
11	04139	04532	04922	05308	05690	06070	06446	06819	07188	07555	363
12	07918	08279	08636	08991	09342	09691	10037	10380	10721	11059	335
13	11394	11727	12057	12385	12710	13033	13354	13672	13988	14301	312
14	14613	14922	15229	15534	15836	16137	16435	16732	17026	17319	290
15	17609	17898	18184	18469	18752	19033	19312	19590	19866	20140	272
16	20412	20683	20952	21219	21484	21748	22011	22272	22531	22789	256
17	23045	23300	23553	23805	24055	24304	24551	24797	25042	25285	242
18	25527	25768	26007	26245	26482	26717	26951	27184	27416	27646	229
19	27875	28103	28330	28556	28780	29003	29226	29447	29667	29885	218
20	30103	30320	30535	30750	30963	31175	31387	31597	31806	32015	207
21	32222	32428	32634	32838	33041	33244	33445	33646	33846	34044	198
22	34242	34439	34635	34830	35025	35218	35411	35603	35793	35984	189
23	36173	36361	36549	36736	36922	37107	37291	37475	37658	37840	181
24	38021	38202	38382	38561	38739	38917	39094	39270	39445	39620	174
25	39794	39967	40140	40312	40483	40654	40824	40993	41162	41330	167
26	41497	41664	41830	41996	42160	42325	42488	42651	42813	42975	161
27	43136	43297	43457	43616	43775	43933	44091	44248	44404	44560	156
28	44716	44871	45025	45179	45332	45484	45637	45788	45939	46090	150
29	46240	46389	46538	46687	46835	46982	47129	47276	47422	47567	145
30	47712	47857	48001	48144	48287	48430	48572	48714	48855	48996	140
31	49136	49276	49415	49554	49693	49831	49969	50106	50243	50379	136
32	50515	50651	50786	50920	51055	51188	51322	51455	51587	51720	132
33	51851	51983	52114	52244	52375	52504	52634	52763	52892	53020	128
34	53148	53275	53403	53529	53656	53782	53908	54033	54158	54283	124
35	54407	54531	54654	54777	54900	55023	55145	55267	55388	55509	121
36	55630	55751	55871	55991	56110	56229	56348	56467	56585	56703	117
37	56820	56937	57054	57171	57287	57403	57519	57634	57749	57864	114
38	57978	58092	58206	58320	58433	58546	58659	58771	58883	58995	111
39	59106	59218	59329	59439	59550	59660	59770	59879	59988	60097	109
40	60206	60314	60423	60531	60638	60746	60853	60959	61066	61172	106
41	61278	61384	61490	61595	61700	61805	61909	62014	62118	62221	104
42	62325	62428	62531	62634	62737	62839	62941	63043	63144	63246	101
43	63347	63448	63548	63649	63749	63849	63949	64048	64147	64246	99
44	64345	64444	64542	64640	64738	64836	64933	65031	65128	65225	97
Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.

Nr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.
45	65321	65418	65514	65610	65706	65801	65896	65992	66087	66181	95
46	66276	66370	66464	66558	66652	66745	66839	66932	67025	67117	93
47	67210	67302	67394	67486	67578	67669	67761	67852	67943	68034	90
48	68124	68215	68305	68395	68485	68574	68664	68753	68842	68931	89
49	69020	69108	69197	69285	69373	69461	69548	69636	69723	69810	87
50	69897	69984	70070	70157	70243	70329	70415	70501	70586	70672	86
51	70757	70842	70927	71012	71096	71181	71265	71349	71433	71517	84
52	71600	71684	71767	71850	71933	72016	72099	72181	72263	72346	83
53	72428	72509	72591	72673	72754	72835	72916	72997	73078	73159	81
54	73239	73320	73400	73480	73560	73640	73719	73799	73878	73957	80
55	74036	74115	74194	74273	74351	74429	74507	74586	74663	74741	78
56	74819	74896	74974	75051	75128	75205	75282	75358	75435	75511	77
57	75587	75664	75740	75815	75891	75967	76042	76118	76193	76268	76
58	76343	76418	76492	76567	76641	76716	76790	76864	76938	77012	74
59	77085	77159	77232	77305	77379	77452	77525	77597	77670	77743	73
60	77815	77887	77960	78032	78104	78176	78247	78319	78390	78462	72
61	78533	78604	78675	78746	78817	78888	78958	79029	79099	79169	71
62	79239	79309	79379	79449	79518	79588	79657	79727	79796	79865	69
63	79934	80003	80072	80140	80209	80277	80346	80414	80482	80550	68
64	80618	80686	80754	80821	80889	80956	81023	81090	81158	81224	67
65	81291	81358	81425	81491	81558	81624	81690	81757	81823	81889	66
66	81954	82020	82086	82151	82217	82282	82347	82413	82478	82543	65
67	82607	82672	82737	82802	82866	82930	82995	83059	83123	83187	64
68	83251	83315	83378	83442	83506	83569	83632	83696	83759	83822	63
69	83885	83948	84011	84073	84136	84198	84261	84323	84386	84448	63
70	84510	84572	84634	84696	84757	84819	84880	84942	85003	85065	62
71	85126	85187	85248	85309	85370	85431	85491	85552	85612	85673	61
72	85733	85794	85854	85914	85974	86034	86094	86153	86213	86273	60
73	86332	86392	86451	86510	86570	86629	86688	86747	86806	86864	59
74	86923	86982	87040	87099	87157	87216	87274	87332	87390	87448	58
75	87506	87564	87622	87679	87737	87795	87852	87910	87967	88024	58
76	88081	88138	88195	88252	88309	88366	88423	88480	88536	88593	57
77	88649	88705	88762	88818	88874	88930	88986	89042	89098	89154	56
78	89209	89265	89321	89376	89432	89487	89542	89597	89653	89708	55
79	89763	89818	89873	89927	89982	90037	90091	90146	90200	90255	55
80	90309	90363	90417	90472	90526	90580	90634	90687	90741	90795	54
81	90849	90902	90956	91009	91062	91116	91169	91222	91275	91328	53
82	91381	91434	91487	91540	91593	91645	91698	91751	91803	91855	52
83	91908	91960	92012	92065	92117	92169	92221	92273	92324	92376	52
84	92428	92480	92531	92583	92634	92686	92737	92788	92840	92891	51
85	92942	92993	93044	93095	93146	93197	93247	93298	93349	93399	51
86	93450	93500	93551	93601	93651	93702	93752	93802	93852	93902	50
87	93952	94002	94052	94101	94151	94201	94250	94300	94349	94399	50
88	94448	94498	94547	94596	94645	94694	94743	94792	94841	94890	49
89	94939	94988	95036	95085	95134	95182	95231	95279	95328	95376	49
90	95424	95472	95521	95569	95617	95665	95713	95761	95809	95856	48
91	95904	95952	95999	96047	96095	96142	96190	96237	96284	96332	47
92	96379	96426	96473	96520	96567	96614	96661	96708	96755	96802	47
93	96848	96895	96942	96988	97035	97081	97128	97174	97220	97267	46
94	97313	97359	97405	97451	97497	97543	97589	97635	97681	97727	46
Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.

Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.
95	97772	97818	97864	97909	97955	98000	98046	98091	98137	98182	45
96	98227	98272	98318	98363	98408	98453	98498	98543	98588	98632	45
97	98677	98722	98767	98811	98856	98900	98945	98989	99034	99078	45
98	99123	99167	99211	99255	99300	99344	99388	99432	99476	99520	44
99	99564	99607	99651	99695	99739	99782	99826	99870	99913	99957	44
100	00000	00043	00087	00130	00173	00217	00260	00303	00346	00389	43
101	00432	00475	00518	00561	00604	00647	00689	00732	00775	00817	43
102	00860	00903	00945	00988	01030	01072	01115	01157	01199	01242	42
103	01284	01326	01368	01410	01452	01494	01536	01578	01620	01662	42
104	01703	01745	01787	01828	01870	01912	01953	01995	02036	02078	42
105	02119	02160	02202	02243	02284	02325	02366	02407	02449	02490	41
106	02531	02572	02612	02653	02694	02735	02776	02816	02857	02898	41
107	02938	02979	03019	03060	03100	03141	03181	03222	03262	03302	41
108	03342	03383	03423	03463	03503	03543	03583	03623	03663	03703	40
109	03743	03782	03822	03862	03902	03941	03981	04021	04060	04100	40
110	04139	04179	04218	04258	04297	04336	04376	04415	04454	04493	39
111	04532	04571	04610	04650	04689	04727	04766	04805	04844	04883	39
112	04922	04961	04999	05038	05077	05115	05154	05192	05231	05269	39
113	05308	05346	05385	05423	05461	05500	05538	05576	05614	05652	38
114	05690	05729	05767	05805	05843	05881	05918	05956	05994	06032	38
115	06070	06108	06145	06183	06221	06258	06296	06333	06371	06408	38
116	06446	06483	06521	06558	06595	06633	06670	06707	06744	06781	37
117	06819	06856	06893	06930	06967	07004	07041	07078	07115	07151	37
118	07188	07225	07262	07298	07335	07372	07408	07445	07482	07518	37
119	07555	07591	07628	07664	07700	07737	07773	07809	07846	07882	36
Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Diff.

